SEXTA EDICIÓN

FÍSICA

SEXTA EDICIÓN

FÍSICA

Jerry D. Wilson
Lander University
Greenwood, SC

Anthony J. Buffa
California Polytechnic State University
San Luis Obispo, CA

Bo Lou
Ferris State University
Big Rapids, MI

TRADUCCIÓN
Ma. de Lourdes Amador Araujo
Traductora profesional

REVISIÓN TÉCNICA
Alberto Lima Sánchez
Preparatoria de la Universidad La Salle

PEARSON Educación®

México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

WILSON, JERRY; ANTHONY J. BUFA; BO LOU

Física. Sexta edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2007

ISBN: 978-970-26-0851-6

Formato: 21 × 27 cm Páginas: 912

ISBN 0-13-149579-8

Edición en español
Editor: Enrique Quintanar Duarte
e-mail: enrique.quintanar@pearsoned.com
Editor de desarrollo: Felipe Hernández Carrasco
Supervisor de producción: Enrique Trejo Hernández

Edición en inglés
Senior Editor: Erik Fahlgren
Associate Editor: Christian Botting
Editor in Chief, Science: Dan Kaveney
Executive Managing Editor: Kathleen Schiaparelli
Assistant Managing Editor: Beth Sweeten
Manufacturing Buyer: Alan Fischer
Manufacturing Manager: Alexis Heydt-Long
Director of Creative Services: Paul Belfanti
Creative Director: Juan López
Art Director: Heather Scott
Director of Marketing, Science: Patrick Lynch
Media Editor: Michael J. Richards
Senior Managing Editor, Art Production and Management: Patricia Burns
Manager, Production Technologies: Matthew Haas
Managing Editor, Art Management: Abigail Bass
Art Editor: Eric Day
Art Studio: ArtWorks
Image Coordinator: Cathy Mazzucca
Mgr Rights & Permissions: Zina Arabia
Photo Researchers: Alexandra Truitt & Jerry Marshall
Research Manager: Beth Brenzel
Interior and Cover Design: Tamara Newnam
Cover Image: Greg Epperson/Index Stock Imagery
Managing Editor, Science Media: Nicole Jackson
Media Production Editors: William Wells, Dana Dunn
Editorial Assistant: Jessica Berta
Production Assistant: Nancy Bauer
Production Supervision/Composition: Prepare, Inc.

SEXTA EDICIÓN, 2007

PEARSON Educación ®

ISBN 10: 970-26-0851-1
ISBN 13: 978-970-26-0851-6
Impreso en México. *Printed in Mexico.*
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 10 09 08

ACERCA DE LOS AUTORES

Jerry D. Wilson nació en Ohio y es profesor emérito de física y ex director de la División de Ciencias Físicas y Biológicas de Lander University en Greenwood, Carolina del Sur. Recibió el grado de licenciado en ciencias de la Universidad de Ohio, el grado de maestro en ciencias del Union College y, en 1970, el grado de doctor en física de la Universidad de Ohio. Obtuvo el grado de maestro en ciencias mientras trabajaba como físico especialista en el comportamiento de materiales.

Cuando estudiaba el doctorado, el profesor Wilson inició su carrera docente impartiendo cursos de física. Durante ese tiempo, fue coautor de un texto de física, del que actualmente circula la undécima edición. En combinación con su carrera docente, el profesor Wilson ha continuado con su labor de escribir libros, y es autor o coautor de seis textos. Aunque actualmente se ha retirado como profesor de tiempo completo, continúa escribiendo libros y artículos. Actualmente escribe la columna titulada *The Curiosity Corner*, que se publica semanalmente en periódicos locales y que también se encuentra disponible en Internet.

Anthony J. Buffa recibió el grado de licenciado en ciencias físicas del Rensselaer Polytechnic Institute en Troy, Nueva York, y el grado de doctor en física de la Universidad de Illinois, en Urbana-Champaign. En 1970, el profesor Buffa se incorporó al cuerpo docente de California Polytechnic State University, en San Luis Obispo. Se retiró recientemente y ahora es maestro de medio tiempo en Cal Poly, como profesor emérito de física. Ha realizado trabajos de investigación en física nuclear en diferentes laboratorios de aceleradores de partículas, incluido el LAMPF en Los Alamos National Laboratory. Trabajó como investigador asociado en el departamento de radioanalítica durante 16 años.

El principal interés del profesor Buffa sigue siendo la docencia. En el Cal Poly ha impartido cursos que van desde la introducción a la física hasta la mecánica cuántica; también desarrolló y supervisó numerosos experimentos de laboratorio e impartió cursos de física a los profesores de primaria y secundaria en los talleres organizados por la National Science Foundation (NSF). Combinando la física con su interés por el arte y la arquitectura, el doctor Buffa realiza trabajo artístico y hace sus propios dibujos, que utiliza para reforzar la efectividad de su labor en la enseñanza de la física. Además de continuar en la docencia, durante su retiro parcial, él y su esposa tratan de viajar más y esperan disfrutar de sus nietos durante mucho tiempo.

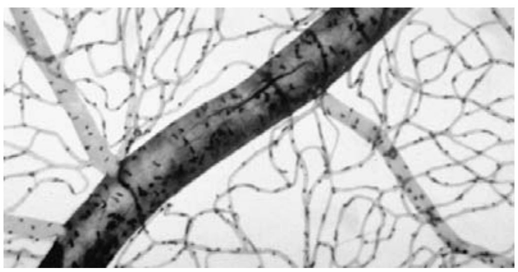
Bo Lou es profesor de física en Ferris State University en Michigan. Sus responsabilidades primordiales como docente son impartir cursos de introducción a la física y de laboratorio en el nivel de licenciatura. El profesor Lou enfatiza la importancia de la comprensión conceptual de las leyes y los principios básicos de la física y de sus aplicaciones prácticas al mundo real. También es un defensor entusiasta del uso de la tecnología en la enseñanza y el aprendizaje.

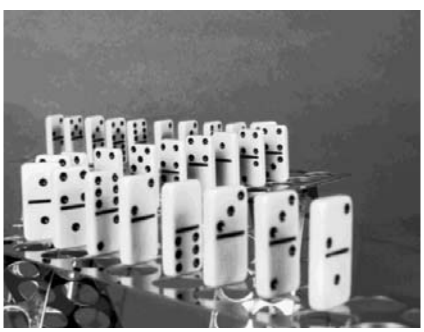
El profesor Lou recibió los grados de licenciado y de maestro en ciencias en ingeniería óptica de la Universidad de Zhejiang, en China, en 1982 y 1985, respectivamente, y el grado de doctor en física en el campo de materia condensada de la Universidad Emory en 1989.

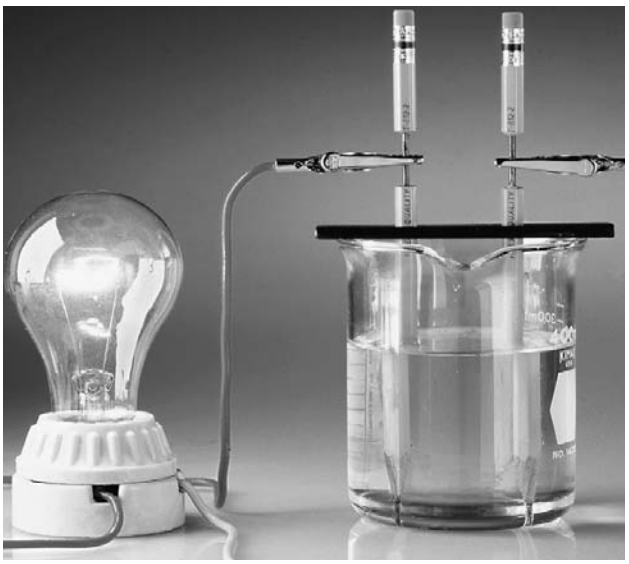
El doctor Lou, su esposa Lingfei y su hija Alina residen actualmente en Big Rapids, Michigan. La familia Lou disfruta de los viajes, la naturaleza y el tenis.

CONTENIDO ABREVIADO

CONTENIDO







APRENDER DIBUJANDO

Aplicaciones [Las secciones A fondo aparecen en **negritas**; **(bio)** indica una aplicación biomédica]

PREFACIO

Creemos que hay dos metas básicas en un curso de introducción a la física: 1. ayudar a comprender los conceptos básicos y 2. habilitar a los estudiantes a utilizar esos conceptos en la resolución de una variedad de problemas.

Estas metas están vinculadas. Queremos que los estudiantes apliquen su comprensión conceptual conforme resuelven problemas. Por desgracia, los estudiantes a menudo comienzan el proceso de resolución de problemas buscando una ecuación. Existe la tentación de hacer embonar los números en las ecuaciones antes de visualizar la situación o de considerar los conceptos físicos que podrían utilizarse para resolver el problema. Además, los estudiantes pocas veces revisan su respuesta numérica para ver si concuerda con su comprensión de un concepto físico relevante.

Creemos —y los usuarios están de acuerdo— que las fortalezas de este libro de texto son las siguientes:

Base conceptual. Ayudar a los estudiantes a comprender los principios físicos casi invariablemente fortalece sus habilidades para resolver problemas. Hemos organizado las explicaciones e incorporado herramientas pedagógicas para asegurar que la comprensión de los conceptos conduzca al desarrollo de habilidades prácticas.

Cobertura concisa. Para mantener un enfoque agudo en lo esencial, hemos evitado temas de interés marginal. No deducimos relaciones cuando no arrojan luz sobre el principio en cuestión. Por lo general, es más importante que los estudiantes en este curso comprendan lo que una relación significa y cómo puede utilizarse para comprender las técnicas matemáticas o analíticas empleadas en obtenerla.

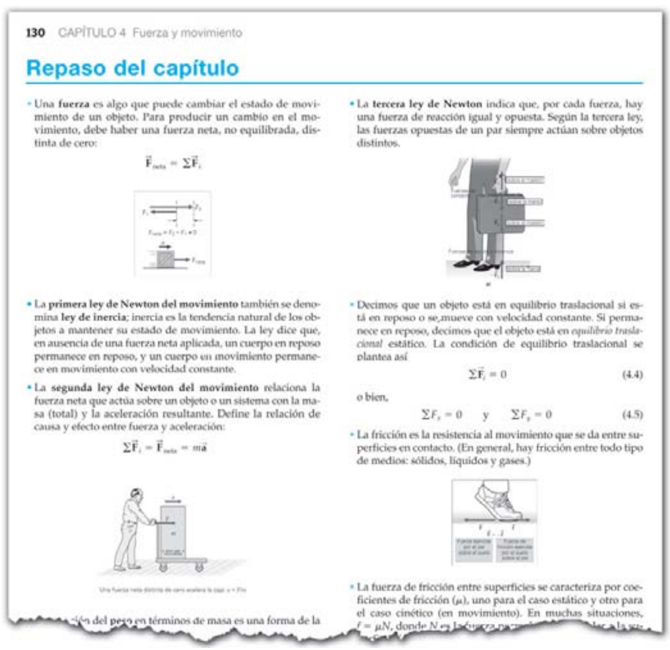
Aplicaciones. *Física* es un texto que se reconoce por la fuerte mezcla de aplicaciones relacionadas con la medicina, la ciencia, la tecnología y la vida diaria de las que se habla tanto en el cuerpo central del texto como en los recuadros *A fondo*. Al mismo tiempo que la sexta edición continúa incluyendo una amplia gama de aplicaciones, también hemos aumentado el número de aplicaciones biológicas y biomédicas, en atención al alto porcentaje de estudiantes de medicina y de campos relacionados con la salud que toman este curso. Una lista completa de aplicaciones, con referencias de página, se encuentra en las páginas X a XIII.

La sexta edición

Mientras trabajamos para reducir el número total de páginas en esta edición, hemos agregado material para fomentar una mayor comprensión de los estudiantes y para hacer de la física una materia más relevante, interesante y memorable para ellos.

Hechos de física. Cada capítulo comienza con varios hechos de física (entre cuatro y seis) acerca de descubrimientos o fenómenos cotidianos aplicables al tema central.

Resumen visual. El resumen al final de cada capítulo incluye representaciones visuales de los conceptos clave, que sirven como recordatorio para los estudiantes conforme repasan.


130 CAPÍTULO 4 Fuerza y movimiento

Repaso del capítulo

• Una **fuerza** es algo que puede cambiar el estado de movimiento de un objeto. Para producir un cambio en el movimiento, debe haber una fuerza neta, no equilibrada, distinta de cero:

$$\vec{\mathbf{F}}_{neta} = \Sigma\vec{\mathbf{F}}_i$$

• La **primera ley de Newton del movimiento** también se denomina **ley de inercia**; inercia es la tendencia natural de los objetos a mantener su estado de movimiento. La ley dice que, en ausencia de una fuerza neta aplicada, un cuerpo en reposo permanece en reposo, y un cuerpo en movimiento permanece en movimiento con velocidad constante.

• La **segunda ley de Newton del movimiento** relaciona la fuerza neta que actúa sobre un objeto o un sistema con la masa (total) y la aceleración resultante. Define la relación de causa y efecto entre fuerza y aceleración:

$$\Sigma\vec{\mathbf{F}}_i = \vec{\mathbf{F}}_{neta} = m\vec{\mathbf{a}}$$

...ción del peso en términos de masa es una forma de la

• La **tercera ley de Newton** indica que, por cada fuerza, hay una fuerza de reacción igual y opuesta. Según la tercera ley, las fuerzas opuestas de un par siempre actúan sobre objetos distintos.

• Decimos que un objeto está en equilibrio traslacional si está en reposo o se mueve con velocidad constante. Si permanece en reposo, decimos que el objeto está en *equilibrio traslacional* estático. La condición de equilibrio traslacional se plantea así

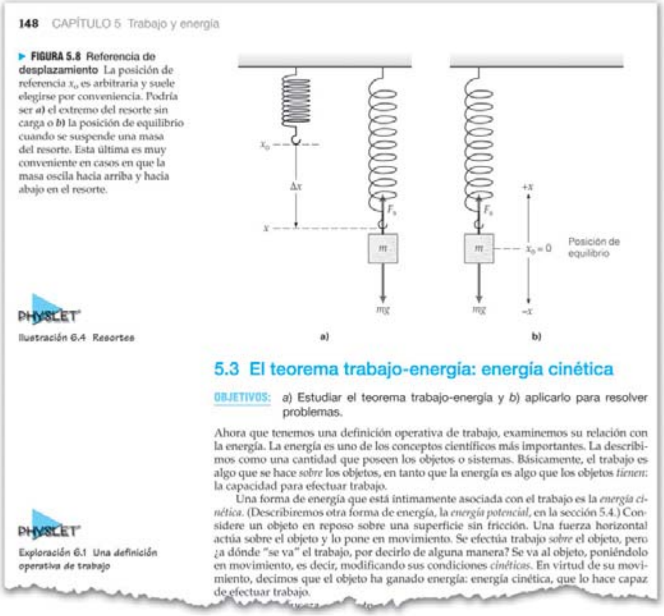
$$\Sigma\vec{\mathbf{F}}_i = 0 \qquad (4.4)$$

o bien,

$$\Sigma F_x = 0 \quad \text{y} \quad \Sigma F_y = 0 \qquad (4.5)$$

• La fricción es la resistencia al movimiento que se da entre superficies en contacto. (En general, hay fricción entre todo tipo de medios: sólidos, líquidos y gases.)

• La fuerza de fricción entre superficies se caracteriza por coeficientes de fricción (μ), uno para el caso estático y otro para el caso cinético (en movimiento). En muchas situaciones, $f = \mu N$, donde N es la fuerza ...



148 CAPÍTULO 5 Trabajo y energía

▶ **FIGURA 5.8 Referencia de desplazamiento** La posición de referencia x_o es arbitraria y suele elegirse por conveniencia. Podría ser **a)** el extremo del resorte sin carga o **b)** la posición de equilibrio cuando se suspende una masa del resorte. Esta última es muy conveniente en casos en que la masa oscila hacia arriba y hacia abajo en el resorte.

PHYSLET® Ilustración 6.4 Resortes

5.3 El teorema trabajo-energía: energía cinética

OBJETIVOS: *a)* Estudiar el teorema trabajo-energía y *b)* aplicarlo para resolver problemas.

Ahora que tenemos una definición operativa de trabajo, examinemos su relación con la energía. La energía es uno de los conceptos científicos más importantes. La describimos como una cantidad que poseen los objetos o sistemas. Básicamente, el trabajo es algo que se hace *sobre* los objetos, en tanto que la energía es algo que los objetos *tienen*: la capacidad para efectuar trabajo.

Una forma de energía que está íntimamente asociada con el trabajo es la *energía cinética*. (Describiremos otra forma de energía, la *energía potencial*, en la sección 5.4.) Considere un objeto en reposo sobre una superficie sin fricción. Una fuerza horizontal actúa sobre el objeto y lo pone en movimiento. Se efectúa trabajo *sobre* el objeto, pero ¿a dónde "se va" el trabajo, por decirlo de alguna manera? Se va al objeto, poniéndolo en movimiento, es decir, modificando sus condiciones *cinéticas*. En virtud de su movimiento, decimos que el objeto ha ganado energía: energía cinética, que lo hace capaz de efectuar trabajo.

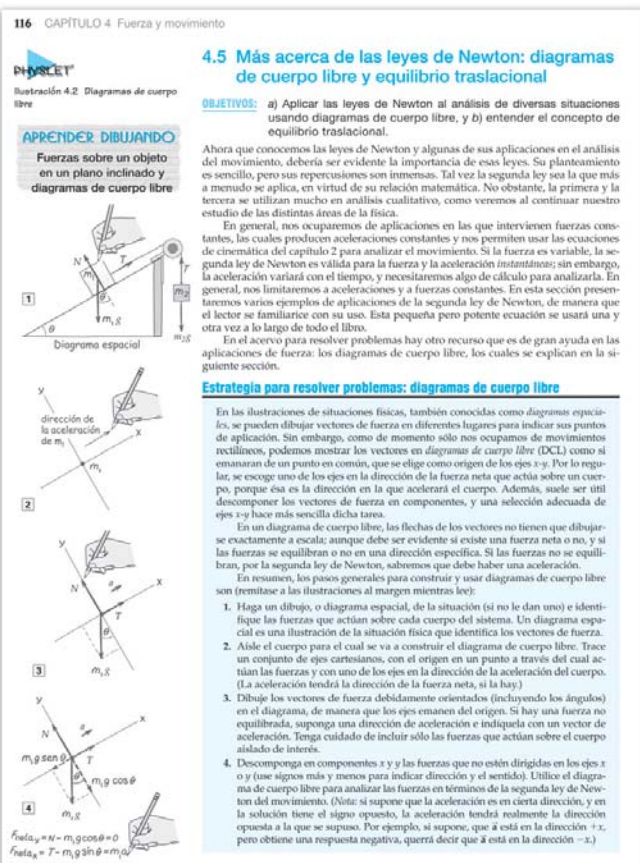
PHYSLET® Exploración 6.1 Una definición operativa de trabajo

Integración de Physlet® Physics. Physlets son aplicaciones basadas en Java, que ilustran conceptos de física a través de la animación. *Physlet Physics* es un libro y un CD-ROM de amplia aceptación que contienen más de 800 Physlets en tres diferentes formatos: Ilustraciones Physlet, Exploraciones Physlet y Problemas Physlet. En la sexta edición de *Física*, los Physlets de *Physlet Physics* se denotan con un icono para que los estudiantes sepan cuándo una explicación y una animación alternativa están disponibles para apoyar la comprensión. El CD-ROM de *Physlet Physics* se incluye al adquirir el nuevo libro de texto.

Aplicaciones biológicas. No sólo aumentamos el número, sino que también ampliamos el alcance de las aplicaciones biológicas y biomédicas. Ejemplos de nuevas aplicaciones biológicas incluyen el uso de la energía corporal como fuente de potencia, la osteoporosis y la densidad mineral ósea, y la fuerza magnética en la medicina del futuro.

Hemos enriquecido las siguientes características pedagógicas en la sexta edición:

Aprendizaje mediante dibujos. La visualización es uno de los pasos más importantes en la resolución de problemas. En muchos casos, si los estudiantes elaboran un boceto de un problema, son capaces de resolverlo. La sección "Aprender dibujando" ayuda a los estudiantes de manera específica a hacer cierto tipo de bocetos y gráficas que les darán una comprensión clave en una variedad de situaciones de física.



116 CAPÍTULO 4 Fuerza y movimiento

PHYSLET® Ilustración 4.2 Diagramas de cuerpo libre

APRENDER DIBUJANDO
Fuerzas sobre un objeto en un plano inclinado y diagramas de cuerpo libre

4.5 Más acerca de las leyes de Newton: diagramas de cuerpo libre y equilibrio traslacional

OBJETIVOS: *a)* Aplicar las leyes de Newton al análisis de diversas situaciones usando diagramas de cuerpo libre, y *b)* entender el concepto de equilibrio traslacional.

Ahora que conocemos las leyes de Newton y algunas de sus aplicaciones en el análisis del movimiento, debería ser evidente la importancia de esas leyes. Su planteamiento es sencillo, pero sus repercusiones son inmensas. Tal vez la segunda ley sea la que más a menudo se aplica, en virtud de su relación matemática. No obstante, la primera y la tercera se utilizan mucho en análisis cualitativo, como veremos al continuar nuestro estudio de las distintas áreas de la física.

En general, nos ocuparemos de aplicaciones en las que intervienen fuerzas constantes, las cuales producen aceleraciones constantes y nos permiten usar las ecuaciones de cinemática del capítulo 2 para analizar el movimiento. Si la fuerza es variable, la segunda ley de Newton es válida para la fuerza y la aceleración *instantáneas*; sin embargo, la aceleración variará con el tiempo, y necesitaremos algo de cálculo para analizarla. En general, nos limitaremos a aceleraciones y a fuerzas constantes. En esta sección presentaremos varios ejemplos de aplicaciones de la segunda ley de Newton, de manera que el lector se familiarice con su uso. Esta pequeña pero potente ecuación se usará una y otra vez a lo largo de todo el libro.

En el acervo para resolver problemas hay otro recurso que es de gran ayuda en las aplicaciones de fuerza: los diagramas de cuerpo libre, los cuales se explican en la siguiente sección.

Estrategia para resolver problemas: diagramas de cuerpo libre

En las ilustraciones de situaciones físicas, también conocidas como *diagramas espaciales*, se pueden dibujar vectores de fuerza en diferentes lugares para indicar sus puntos de aplicación. Sin embargo, como de momento sólo nos ocupamos de movimientos rectilíneos, podemos mostrar los vectores en *diagramas de cuerpo libre* (DCL) como si emanaran de un punto en común, que se elige como origen de los ejes *x*-*y*. Por lo regular, se escoge uno de los ejes en la dirección de la fuerza neta que actúa sobre un cuerpo, porque ésa es la dirección en la que acelerará el cuerpo. Además, suele ser útil descomponer los vectores de fuerza en componentes, y una selección adecuada de ejes *x*-*y* hace más sencilla dicha tarea.

En un diagrama de cuerpo libre, las flechas de los vectores no tienen que dibujarse exactamente a escala; aunque debe ser evidente si existe una fuerza neta o no, y si las fuerzas se equilibran o no en una dirección específica. Si las fuerzas no se equilibran, por la segunda ley de Newton, sabremos que debe haber una aceleración.

En resumen, los pasos generales para construir y usar diagramas de cuerpo libre son (remítase a las ilustraciones al margen mientras lee):

1. Haga un dibujo, o diagrama espacial, de la situación (si no le dan uno) e identifique las fuerzas que actúan sobre cada cuerpo del sistema. Un diagrama espacial es una ilustración de la situación física que identifica los vectores de fuerza.
2. Aísle el cuerpo para el cual se va a construir el diagrama de cuerpo libre. Trace un conjunto de ejes cartesianos, con el origen en un punto a través del cual actúan las fuerzas y con uno de los ejes en la dirección de la aceleración del cuerpo. (La aceleración tendrá la dirección de la fuerza neta, si la hay.)
3. Dibuje los vectores de fuerza debidamente orientados (incluyendo los ángulos) en el diagrama, de manera que los ejes emanen del origen. Si hay una fuerza no equilibrada, suponga una dirección de aceleración e indíquela con un vector de aceleración. Tenga cuidado de incluir sólo las fuerzas que actúan sobre el cuerpo aislado de interés.
4. Descomponga en componentes *x* y *y* las fuerzas que no estén dirigidas en los ejes *x* o *y* (use signos más y menos para indicar dirección y el sentido). Utilice el diagrama de cuerpo libre para analizar las fuerzas en términos de la segunda ley de Newton del movimiento. (*Nota:* si supone que la aceleración es en cierta dirección, y en la solución tiene el signo opuesto, la aceleración tendrá realmente la dirección opuesta a la que se supuso. Por ejemplo, si supone, que $\vec{a}$ está en la dirección $+x$, pero obtiene una respuesta negativa, querrá decir que $\vec{a}$ está en la dirección $-x$.)

Procedimiento sugerido de resolución de problemas. El apartado 1.7 brinda un esquema de trabajo para pensar acerca de la resolución de problemas. Esta sección incluye lo siguiente:

- Una panorámica de las estrategias de resolución de problemas
- Un procedimiento de seis pasos que es suficientemente general como para aplicarse a la mayoría de los problemas en física, pero que se utiliza fácilmente en situaciones específicas
- Ejemplos que ilustran con detalle el proceso de resolución de problemas y que muestran cómo se aplica en la práctica el procedimiento general

Estrategias de resolución de problemas y sugerencias. El tratamiento inicial de la resolución de problemas se sigue a través del libro con abundancia de sugerencias, consejos, advertencias, atajos y técnicas útiles para resolver tipos específicos de problemas. Estas estrategias y sugerencias ayudan a los estudiantes a aplicar principios generales a contexto específicos, así como a evadir los escollos y malos entendidos más comunes.

Ejemplos conceptuales. Estos ejemplos piden a los estudiantes que piensen acerca de una situación física y que resuelvan conceptualmente una pregunta o que elijan la predicción correcta a partir de un conjunto de resultados posibles, sobre la base de una comprensión de principios relevantes. La explicación que sigue ("Razonamiento y respuesta") explica con claridad cómo identificar la respuesta correcta, así como por qué las demás respuestas eran incorrectas.

Ejemplos trabajados. Tratamos de hacer los ejemplos del texto tan claros y detallados como fuera posible. El objetivo no es tan sólo mostrar a los estudiantes qué ecuaciones utilizar, sino también explicar la estrategia empleada y el papel de cada paso en el plan general. Se anima a los estudiantes a que aprendan el "porqué" de cada paso junto con el "cómo". Nuestra meta es brindar un modelo que sirva a los estudiantes para resolver problemas. Cada ejemplo trabajado incluye lo siguiente:

- ***Razonamiento*** que centra a los estudiantes en el pensamiento y análisis críticos que deben realizar antes de comenzar a utilizar las ecuaciones.
- ***Dado*** y ***Encuentre*** constituyen la primera parte de cada ***Solución*** para recordar a los alumnos la importancia de identificar lo que se conoce y lo que necesita resolverse.
- ***Ejercicios de refuerzo*** al final de cada ejemplo conceptual y de cada ejemplo trabajado refuerzan la importancia de la comprensión conceptual y ofrecen práctica adicional. (Las respuestas a los ejercicios de refuerzo se presentan al final del libro.)

Ejemplos integrados. Para reforzar aún más la conexión entre comprensión conceptual y resolución cuantitativa de problemas, hemos desarrollado ejemplos integrados para cada capítulo. Estos ejemplos se trabajan a través de una situación física de forma tanto cualitativa como cuantitativa. La parte cualitativa se resuelve seleccionando conceptualmente la respuesta correcta a partir de un conjunto de posibles respuestas. La parte cuantitativa supone una solución matemática relacionada con la parte conceptual, demostrando cómo la comprensión conceptual y los cálculos numéricos van de la mano.

Ejercicios al final de cada capítulo. Cada apartado del material final de los capítulos comienza con preguntas de opción múltiple (**OM**) para permitir a los estudiantes autoevaluarse rápidamente sobre el tema en cuestión. Luego se presentan preguntas conceptuales de respuesta corta (**PC**) que prueban la comprensión conceptual de los estudiantes y les piden razonar los principios. Los problemas cuantitativos redondean los ejercicios en cada apartado. *Física* incluye respuestas cortas a todos los ejercicios de número impar (cuantitativos *y* conceptuales) al final del libro, de manera que los estudiantes pueden verificar su comprensión.

Ejercicios apareados. Para animar a los estudiantes a que trabajen los problemas por sí mismos, la mayoría de las secciones incluyen por lo menos un conjunto de ejercicios apareados que se relacionan con situaciones similares. El primer problema de un par se resuelve en *Student Study Guide and Solutions Manuals*; el segundo problema, que explora una situación similar a la que se presentó en el primero, sólo tiene una respuesta al final del libro.

Ejercicios integrados. Al igual que los ejemplos integrados en el capítulo, los ejercicios integrados (**EI**) piden a los estudiantes resolver un problema cuantitativamente, así como una respuesta a una pregunta conceptual relacionada con el ejercicio. Al responder ambas partes, los estudiantes pueden ver si su respuesta numérica concuerda con su comprensión conceptual.

Ejercicios adicionales. Para asegurarse de que los estudiantes son capaces de sintetizar conceptos, cada capítulo concluye con un apartado de ejercicios adicionales extraídos de todas las secciones del capítulo y en ocasiones también de los principios básicos de capítulos anteriores.

***Instructor Resource Center on CD-ROM* (0-13-149712-X).** Este conjunto de CD-ROM, nuevo en esta edición, ofrece prácticamente todo recurso electrónico que usted necesitará en clase. Además de que podrá navegar libremente por los CD para encontrar los recursos que desea, el software le permitirá realizar la búsqueda mediante un catálogo de recursos. Los CD-ROM están organizados por capítulo e incluyen todas las ilustraciones y tablas de la sexta edición del libro en formatos JPEG y PowerPoint. Los IRC/CD también contienen el generador de pruebas *TestGenerator*, una poderosa plataforma dual y un software que se puede trabajar en red para crear pruebas que van desde breves cuestionarios hasta largos exámenes. Las preguntas del *Test Item File* de la sexta edición incluyen versiones aleatorizadas, de manera que los profesores tienen la posibilidad de utilizar el *Question Editor* para modificar las preguntas o crear nuevas. Los IRC/CD también contienen la versión para el profesor de *Physlet Physics*, esquemas de exposición para cada capítulo en PowerPoint, *ConceptTest* con preguntas para hacer "click" en PowerPoint, archivos de Microsoft Word por capítulo de todas las ecuaciones numeradas, los 11 videos de demostración *Physics You Can See* y versiones en Microsoft Word y PDF de *Test Item File, Instructor's Solutions Manual, Instructor's Resource Manual* y los ejercicios al final de los capítulos de la sexta edición de *Física.*

Companion Website con seguimiento del avance (http://www.prenhall.com/wilson)

Este sitio Web brinda a los estudiantes y profesores novedosos materiales *online* para utilizarse con la sexta edición de *Física*. El Companion Website con seguimiento del avance incluye lo siguiente:

- Integración de *Just-in-Time Teaching* (JiTT) *Warm-Ups, Puzzle, & Applications*, diseñados por Gregor Novak y Andrew Gavrin (Indiana University-Purdue University, Indianapolis): preguntas de calentamiento (*warm-up*) y preguntas de respuesta corta basadas en importantes conceptos presentados en los capítulos del libro. Los *puzzles* o acertijos son preguntas más complicadas que a menudo requieren integrar más de un concepto. Así, los profesores pueden asignar preguntas de calentamiento como cuestionario de lectura antes de la exposición en clase sobre ese tema, y las preguntas acertijo como tareas de refuerzo después de la clase. Los módulos de Applications responden la pregunta "¿para qué sirve la física?", al vincular los conceptos de física a los fenómenos del mundo real y a los avances en ciencia y tecnología. Cada módulo de aplicación contiene preguntas de respuesta corta y preguntas tipo ensayo.
- *Practice Questions:* un módulo de entre 20 y 30 preguntas de opción múltiple ordenadas jerárquicamente para repasar cada capítulo.
- *Ranking Task Exercises,* editados por Thomas O'Kuma (Lee College), David Maloney (Indiana University-Purdue University, Fort Wayne) y Curtis Hieggelke (Joliet Junior College), estos ejercicios conceptuales jerarquizados requieren que los estudiantes asignen un número para calificar diversas situaciones o las posibles variantes de una situación.
- Problemas *Physlet Physics: Physlets* son aplicaciones basadas en Java que ilustran conceptos de física mediante la animación. *Physlet Physics* incluye un libro de amplia circulación y un CD-ROM que contiene más de 800 *Physlets*. Los problemas *Physlet* son versiones interactivas del tipo de ejercicios que comúnmente se asignan como tarea para la casa. Problemas jerarquizados de *Physlet Physics* están disponibles para que los estudiantes se autoevalúen. Para tener acceso a ellos, los estudiantes utilizan su copia de *Physlet Physics* en CD-ROM, que se incluye junto con el presente libro.
- *MCAT Study Guide*, por Kaplan Test Prep and Admissions: esta guía ofrece a los estudiantes 10 pruebas sobre temas y conceptos comprendidos en el examen MCAT.

Blackboard. Blackboard es una plataforma de software extensa y flexible que ofrece un sistema de administración del curso, portales institucionales personalizados, comunidades *online* y una avanzada arquitectura que permite la integración de múltiples sistemas administrativos con base en la Web. Entre sus características están las siguientes:

- Seguimiento del progreso, administración de clases y de alumnos, libro de calificaciones, comunicación, tareas y herramientas de reporte.
- Programas de exámenes que ayudan a los profesores a diseñar versiones electrónicas de exámenes y pruebas sobre el contenido de la sexta edición de *Física*, a calificar automáticamente y a llevar un control de los resultados. Todas las pruebas pueden incluirse en el libro de calificaciones para una fácil administración del curso.
- Herramientas de comunicación como clase virtual (salas de *chat*, pizarra, transparencias), documentos compartidos y tableros de avisos.

CourseCompass, manejado por Blackboard. Con el más elevado nivel de servicio, apoyo y capacitación disponible en la actualidad, CourseCompass combina recursos *online* probados y de alta calidad para la sexta edición de *Física*, con herramientas electrónicas de administración de cursos fáciles de usar. CourseCompass está diseñado para satisfacer las necesidades individuales de los profesores, que podrán crear un curso *online* sin contar con habilidades técnicas o capacitación especiales. Entre sus características se encuentran las siguientes:

- Gran flexibilidad: los profesores pueden adaptar los contenidos de Prentice Hall para alcanzar sus propias metas de enseñanza, con escasa o ninguna asistencia externa.
- Evaluación, personalización, administración de clase y herramientas de comunicación.
- Acceso que sólo requiere de hacer clic: los recursos para la sexta edición de *Física* están disponibles a los profesores con un solo clic en el *mouse*.
- Un sistema con apoyo total que libera a los individuos y a las instituciones de gravosas cargas como atacar problemas y dar mantenimiento.

WebCt. WebCt ofrece un poderoso conjunto de herramientas que permite a los profesores diseñar programas educativos prácticos con base en la Web; se trata de recursos ideales para enriquecer un curso o para diseñar uno enteramente *online*. Las herramientas del WebCt, integradas con el contenido de la sexta edición de *Física*, da por resultado un sistema de enseñanza y aprendizaje versátil y enriquecedor. Entre sus características se encuentran las siguientes:

- Monitoreo de páginas y de progreso, administración de clase y de los alumnos, libro de calificaciones, comunicación, calendario y herramientas de reporte.
- Herramientas de comunicación que incluyen salas de *chat*, tableros de avisos, e-mail privado y pizarra.
- Herramientas de evaluación que ayudan a diseñar y administrar exámenes *online*, a calificarlos automáticamente y a llevar control de los resultados.

***WebAssign* (http://www.webassign.com).** El servicio de entrega de tareas *WebAssign* le dará la libertad de diseñar tareas a partir de una base de datos de ejercicios tomados de la sexta edición de *Física*, o de escribir y personalizar sus propios ejercicios. Usted tendrá total control sobre las tareas asignadas a sus alumnos, incluyendo fechas de entrega, contenido, retroalimentación y formatos de preguntas. Entre sus características destacan las siguientes:

- Crea, administra y revisa tareas 24 horas y siete días a la semana.
- Entrega, recoge, califica y registra tareas de forma instantánea.
- Ofrece más ejercicios de práctica, cuestionarios, tareas, actividades de laboratorio y exámenes.
- Asigna aleatoriamente valores numéricos o frases para crear preguntas únicas.
- Evalúa el desempeño de los alumnos para mantenerse al tanto de su progreso individual.
- Clasifica fórmulas algebraicas de acuerdo con su dificultad matemática.
- Capta la atención de sus alumnos que están a distancia.

Reconocimientos

Los miembros de AZTEC —Billy Younger, Michael LoPresto, David Curott y Daniel Lottis—, así como los excelentes revisores Michael Ottinger y Mark Sprague merecen algo más que un agradecimiento especial por su incansable, puntual y muy concienzuda revisión de este libro.

Docenas de otros colegas, que se listan más adelante, nos ayudaron a encontrar los métodos para lograr que esta sexta edición fuera una mejor herramienta de aprendizaje para los estudiantes. Estamos en deuda con ellos por sus atentas sugerencias y críticas constructivas, las cuales beneficiaron ampliamente el texto.

Estamos muy agradecidos con la editorial y con el equipo de producción de Prentice Hall, entre quienes mencionamos a Erick Fahlgren, Editor Sponsor; Heather Scott, Director de Arte; Christian Botting, Editor Asociado; y Jessica Berta, Asistente Editorial. En particular los autores quieren destacar la excelente labor de Simone Lukashov, Editor de Producción: sus amable, profesional y alegre supervisión hizo que el proceso para publicar este libro fuera eficiente y hasta placentero. Además, agradecemos a Karen Karlin, Editora de Desarrollo de Prentice Hall, por su valiosa ayuda en la parte editorial.

Asimismo, yo (Tonny Buffa) de nueva cuenta extiendo mis agradecimientos a mis coautores, Jerry Wilson y Bo Lou, por su entusiasta participación y su enfoque profesional para trabajar en esta edición. Como siempre, varios de mis colegas en Caly Poly nos brindaron su tiempo y sus fructíferos análisis. Entre ellos, menciono a los profesores Joseph Boone, Ronald Brown y Theodore Foster. Mi familia —mis esposa Connie, y mis hijas Jeanne y Julie— fueron, como siempre, una fuerza de apoyo continua y gratificante. También agradezco el apoyo de mi padre, Anthony Buffa y de mi tía Dorothy Abbott. Por último debo un reconocimiento a mis alumnos por contribuir con sus excelentes ideas en los últimos años.

Finalmente nos gustaría motivar a todos los usuarios este libro —estudiantes y profesores— a que nos transmitan cualesquiera sugerencias que tengan para mejorarlo. En verdad esperamos recibirlas.

—Jerry D. Wilson
jwilson@greenwood.net
—Anthony J. Buffa
abuffa@calpoly.edu
—Bo Lou
loub@ferris.edu

Revisores de la sexta edición:

David Aaron
South Dakota State University

E. Daniel Akpanumoh
Houston Community College, Southwest

Ifran Azeem
Embry-Riddle Aeronautical University

Raymond D. Benge
Tarrant County College

Frederick Bingham
University of North Carolina, Wilmington

Timothy C. Black
University of North Carolina, Wilmington

Mary Boleware
Jones County Junior College

Art Braundmeier
Southern Illinois University, Edwardsville

Michael L. Broyles
Collin County Community College

Debra L. Burris
Oklahoma City Community College

Jason Donav
University of Puget Sound

Robert M. Drosd
Portland Community College

Bruce Emerson
Central Oregon Community College

Milton W. Ferguson
Norfolk State University

Phillip Gilmour
Tri-County Technical College

Allen Grommet
East Arkansas Community College

Brian Hinderliter
North Dakota State University

Ben Yu-Kuang Hu
University of Akron

Porter Johnson
Illinois Institute of Technology

Andrew W. Kerr
University of Findlay

Jim Ketter
Linn-Benton Community College

Terrence Maher
Alamance Community College

Kevin McKone
Copiah Lincoln Community College

Kenneth L. Menningen
University of Wisconsin, Stevens Point

Michael Mikhaiel
Passaic County Community College

Ramesh C. Misra
Minnesota State University, Mankato

Sandra Moffet
Linn Benton Community College

Michael Ottinger
Missouri Western State College

James Palmer
University of Toledo

Kent J. Price
Morehead State University

Salvatore J. Rodano
Harford Community College

John B. Ross
Indiana University-Purdue University, Indianapolis

Terry Scott
University of Northern Colorado

Rahim Setoodeh
Milwaukee Area Technical College

Martin Shingler
Lakeland Community College

Mark Sprague
East Carolina State University

Steven M. Stinnett
McNeese State University

John Underwood
Austin Community College

Tristan T. Utschig
Lewis-Clark State College

Steven P. Wells
Louisiana Technical University

Christopher White
Illinois Institute of Technology

Anthony Zable
Portland Community College

John Zelinsky
Community College of Baltimore County, Essex

Revisores de ediciones anteriores

William Achor
Western Maryland College

Alice Hawthorne Allen
Virginia Tech

Arthur Alt
College of Great Falls

Zaven Altounian
McGill University

Frederick Anderson
University of Vermont

Charles Bacon
Ferris State College

Ali Badakhshan
University of Northern Iowa

Anand Batra
Howard University

Michael Berger
Indiana University

William Berres
Wayne State University

James Borgardt
Juniata College

Hugo Borja
Macomb Community College

Bennet Brabson
Indiana University

Jeffrey Braun
University of Evansville

Michael Browne
University of Idaho

David Bushnell
Northern Illinois University

Lyle Campbell
Oklahoma Christian University

James Carroll
Eastern Michigan State University

Aaron Chesir
Lucent Technologies

Lowell Christensen
American River College

Philip A. Chute
University of Wisconsin–Eau Claire

Robert Coakley
University of Southern Maine

Lawrence Coleman
University of California–Davis

Lattie F. Collins
East Tennessee State University

Sergio Conetti
University of Virginia, Charlottesville

James Cook
Middle Tennessee State University

David M. Cordes
Belleville Area Community College

James R. Crawford
Southwest Texas State University

William Dabby
Edison Community College

Purna Das
Purdue University

J. P. Davidson
University of Kansas

Donald Day
Montgomery College

Richard Delaney
College of Aeronautics

James Ellingson
College of DuPage

Donald Elliott
Carroll College

Arnold Feldman
University of Hawaii

John Flaherty
Yuba College

Rober J. Foley
University of Wisconsin–Stout

Lewis Ford
Texas A&M University

Donald Foster
Wichita State University

Donald R. Franceschetti
Memphis State University

Frank Gaev
ITT Technical Institute–Ft. Lauderdale

Rex Gandy
Auburn University

Simon George
California State–Long Beach

Barry Gilbert
Rhode Island College

Richard Grahm
Ricks College

Tom J. Gray
University of Nebraska

Douglas Al Harrington
Northeastern State University

Gary Hastings
Georgia State University

Xiaochun He
Georgia State University

J. Erik Hendrickson
University of Wisconsin–Eau Claire

Al Hilgendorf
University of Wisconsin–Stout

Joseph M. Hoffman
Frostburg State University

Andy Hollerman
University of Louisiana, Layfayette

Jacob W. Huang
Towson University

Randall Jones
Loyola University

Omar Ahmad Karim
University of North Carolina–Wilmington

S. D. Kaviani
El Camino College

Victor Keh
ITT Technical Institute–Norwalk, California

John Kenny
Bradley University

James Kettler
Ohio University, Eastern Campus

Dana Klinck
Hillsborough Community College

Chantana Lane
University of Tennessee–Chattanooga

Phillip Laroe
Carroll College

Rubin Laudan
Oregon State University

Bruce A. Layton
Mississippi Gulf Coast Community College

R. Gary Layton
Northern Arizona University

Kevin Lee
University of Nebraska

Paul Lee
California State University, Northridge

Federic Liebrand
Walla Walla College

Mark Lindsay
University of Louisville

Bryan Long
Columbia State Community College

Michael LoPresto
Henry Ford Community College

Dan MacIsaac
Northern Arizona University

Robert March
University of Wisconsin

Trecia Markes
University of Nebraska–Kearney

Aaron McAlexander
Central Piedmont Community College

William McCorkle
West Liberty State University

John D. McCullen
University of Arizona

Michael McGie
California State University–Chico

Paul Morris
Abilene Christian University

Gary Motta
Lassen College

J. Ronald Mowrey
Harrisburg Area Community College

Gerhard Muller
University of Rhode Island

K. W. Nicholson
Central Alabama Community College

Erin O'Connor
Allan Hancock College

Anthony Pitucco
Glendale Community College

William Pollard
Valdosta State University

R. Daryl Pedigo
Austin Community College

T. A. K. Pillai
University of Wisconsin–La Crosse

Darden Powers
Baylor University

Donald S. Presel
University of Massachusetts–Dartmouth

E. W. Prohofsky
Purdue University

Dan R. Quisenberry
Mercer University

W. Steve Quon
Ventura College

David Rafaelle
Glendale Community College

George Rainey
California State Polytechnic University

Michael Ram
SUNY–Buffalo

William Riley
Ohio State University

William Rolnick
Wayne State University

Robert Ross
University of Detroit–Mercy

Craig Rottman
North Dakota State University

Gerald Royce
Mary Washington College

Roy Rubins
University of Texas, Arlington

Sid Rudolph
University of Utah

Om Rustgi
Buffalo State College

Anne Schmiedekamp
Pennsylvania State University–Ogontz

Cindy Schwarz
Vassar College

Ray Sears
University of North Texas

Mark Semon
Bates College

Bartlett Sheinberg
Houston Community College

Jerry Shi
Pasadena City College

Peter Shull
Oklahoma State University

Thomas Sills
Wilbur Wright College

Larry Silva
Appalachian State University

Michael Simon
Housatonic Community Technical College

Christopher Sirola
Tri-County Technical College

Gene Skluzacek
St. Petersburg College

Soren P. Sorensen
University of Tennessee–Knoxville

Ross Spencer
Brigham Young University

Dennis W. Suchecki
San Diego Mesa College

Frederick J. Thomas
Sinclair Community College

Jacqueline Thornton
St. Petersburg Junior College

Anthony Trippe
ITT Technical Institute–San Diego

Gabriel Umerah
Florida Community College–Jacksonville

Lorin Vant-Hull
University of Houston

Pieter B. Visscher
University of Alabama

Karl Vogler
Northern Kentucky University

John Walkup
California Polytechnic State University

Arthur J. Ward
Nashville State Technical Institute

Larry Weinstein
Old Dominion University

John C. Wells
Tennessee Technical University

Arthur Wiggins
Oakland Community College

Kevin Williams
ITT Technical Institute–Earth City

Linda Winkler
Appalachian State University

Jeffery Wragg
College of Charleston

Rob Wylie
Carl Albert State University

John Zelinsky
Southern Illinois University

Dean Zollman
Kansas State University

CAPÍTULO 1

MEDICIÓN Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

HECHOS DE FÍSICA

- La tradición cuenta que en el siglo XII, el rey Enrique I de Inglaterra decretó que la yarda debería ser la distancia desde la punta de su real nariz a su dedo pulgar teniendo el brazo extendido. (Si el brazo del rey Enrique hubiera sido 3.37 pulgadas más largo, la yarda y el metro tendrían la misma longitud.)
- La abreviatura para la libra, *lb*, proviene de la palabra latina *libra*, que era una unidad romana de peso aproximadamente igual a una libra actual. La palabra equivalente en inglés *pound* viene del latín *pondero*, que significa "pesar". Libra también es un signo del zodiaco y se simboliza con una balanza (que se utiliza para pesar).
- Thomas Jefferson sugirió que la longitud de un péndulo con un periodo de un segundo se utilizara como la medida estándar de longitud.
- ¿Es verdadero el antiguo refrán "Una pinta es una libra en todo el mundo"? Todo depende de qué se esté hablando. El refrán es una buena aproximación para el agua y otros líquidos similares. El agua pesa 8.3 libras por galón, de manera que la octava parte de esa cantidad, o una pinta, pesa 1.04 libras.
- Pi (π), la razón entre la circunferencia de un círculo y su diámetro, es siempre el mismo número sin importar el círculo del que se esté hablando. Pi es un número irracional; esto es, no puede escribirse como la razón entre dos números enteros y es un decimal infinito, que no sigue un patrón de repetición. Las computadoras han calculado π en miles de millones de dígitos. De acuerdo con el *Libro Guinness de los Récords* (2004), π se ha calculado en 1 241 100 000 000 lugares decimales.

¿Es primero y 10? Es necesario medir, como en muchas otras cuestiones de nuestra vida. Las mediciones de longitud nos dicen qué distancia hay entre dos ciudades, qué estatura tienes y, como en esta imagen, si se llegó o no al primero y 10. Las mediciones de tiempo nos dicen cuánto falta para que termine la clase, cuándo inicia el semestre o el trimestre y qué edad tienes. Los fármacos que tomamos cuando estamos enfermos se dan en dosis medidas. Muchas vidas dependen de diversas mediciones realizadas por médicos, técnicos especialistas y farmacéuticos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades.

Las mediciones nos permiten calcular cantidades y resolver problemas. Las unidades también intervienen en la resolución de problemas. Por ejemplo, al determinar el volumen de una caja rectangular, si mide sus dimensiones en pulgadas, el volumen tendría unidades de pulg^3 (pulgadas cúbicas); si se mide en centímetros, entonces serían cm^3 (centímetros cúbicos). Las mediciones y la resolución de problemas forman parte de nuestras vidas. Desempeñan un papel esencialmente importante en nuestros intentos por describir y entender el mundo físico, como veremos en este capítulo. Pero primero veamos por qué se debe estudiar la física (A fondo 1.1).

A FONDO 1.1 ¿POR QUÉ ESTUDIAR FÍSICA?

La pregunta ¿por qué estudiar física? viene a la mente de muchos alumnos durante sus estudios universitarios. La verdad es que probablemente existen tantas respuestas como estudiantes, al igual que sucede con otras materias. Sin embargo, las preguntas podrían agruparse en varias categorías generales, que son las siguientes.

Tal vez usted no pretenda convertirse en un *físico*, pero para los especialistas en esta materia la respuesta es obvia. La introducción a la física provee los fundamentos de su carrera. La meta fundamental de la física es comprender de dónde proviene el universo, cómo ha evolucionado y cómo lo sigue haciendo, así como las reglas (o "leyes") que rigen los fenómenos que observamos. Estos estudiantes utilizarán su conocimiento de la física de forma continua durante sus carreras. Como un ejemplo de la investigación en física, considere la invención del transistor, a finales de la década de 1940, que tuvo lugar en un área especial de la investigación conocida como física del estado sólido.

Quizás usted tampoco pretenda convertirse en un *ingeniero especialista en física aplicada*. Para ellos, la física provee el fundamento de los principios de ingeniería utilizados para resolver problemas tecnológicos (aplicados y prácticos). Algunos de estos estudiantes tal vez no utilicen la física directamente en sus carreras; pero una buena comprensión de la física es fundamental en la resolución de los problemas que implican los avances tecnológicos. Por ejemplo, después de que los físicos inventaron el transistor, los ingenieros desarrollaron diversos usos para éste. Décadas más tarde, los transistores evolucionaron hasta convertirse en los modernos chips de computadora, que en realidad son redes eléctricas que contienen millones de elementos diminutos de transistores.

Es más probable que usted quiera ser un *especialista en tecnología* o en *ciencias biológicas* (médico, terapeuta físico, médico veterinario, especialista en tecnología industrial, etc.). En este caso, la física le brindará un marco de comprensión de los principios relacionados con su trabajo. Aunque las aplicaciones de las leyes de la física tal vez no sean evidentes de forma inmediata, comprenderlas será una valiosa herramienta en su carrera. Si usted se convierte en un profesional de la medicina, por ejemplo, se verá en la necesidad de evaluar resultados de IRM (imágenes de resonancia magnética), un procedimiento habitual en la actualidad. ¿Le sorprendería saber que las IRM se basan en un fenómeno físico llamado *resonancia magnética nuclear*, que descubrieron los físicos y que aún se utiliza para medir las propiedades nucleares y del estado sólido?

Si usted es un estudiante de una *especialidad no técnica*, el requisito de física pretende darle una educación integral; esto es, le ayudará a desarrollar la capacidad de evaluar la tecnología en el contexto de las necesidades sociales. Por ejemplo, quizá tenga que votar en relación con los beneficios fiscales para una fuente de producción de energía, y en ese caso usted querría evaluar las ventajas y las desventajas de ese proceso. O quizás usted se sienta tentado a votar por un funcionario que tiene un sólido punto de vista en torno al desecho del material nuclear. ¿Sus ideas son científicamente correctas? Para evaluarlas, es indispensable tener conocimientos de física.

Como podrá darse cuenta, no hay una respuesta única a la pregunta ¿por qué estudiar física? No obstante, sobresale un asunto primordial: el conocimiento de las leyes de la física ofrece un excelente marco para su carrera y le permitirá comprender el mundo que le rodea, o simplemente, le ayudará a ser un ciudadano más consciente.

1.1 Por qué y cómo medimos

OBJETIVOS: Distinguir entre unidades estándar y sistemas de unidades.

Imagine que alguien le está explicando cómo llegar a su casa. ¿Le serviría de algo que le dijeran: "Tome la calle Olmo durante un rato y dé vuelta a la derecha en uno de los semáforos. Luego siga de frente un buen tramo"? ¿O le agradaría tratar con un banco que le enviara a fin de mes un estado de cuenta que indicara: "Todavía tiene algo de dinero en su cuenta, pero no es mucho"?

Medir es importante para todos nosotros. Es una de las formas concretas en que enfrentamos el mundo. Este concepto resulta crucial en física. *La física se ocupa de describir y entender la naturaleza,* y la medición es una de sus herramientas fundamentales.

Hay formas de describir el mundo físico que no implican medir. Por ejemplo, podríamos hablar del color de una flor o un vestido. Sin embargo, la percepción del color es subjetiva: puede variar de una persona a otra. De hecho, muchas personas padecen daltonismo y no pueden distinguir ciertos colores. La luz que captamos también puede describirse en términos de longitudes de onda y frecuencias. Diferentes longitudes de onda están asociadas con diferentes colores debido a la respuesta fisiológica de nuestros ojos ante la luz. No obstante, a diferencia de las sensaciones o percepciones del color, las longitudes de onda pueden medirse. Son las mismas para todos. En otras palabras, las mediciones son objetivas. *La física intenta describir la naturaleza de forma objetiva usando mediciones.*

Unidades estándar

Las mediciones se expresan en valores unitarios o unidades. Seguramente usted ya sabe que se emplea una gran variedad de unidades para expresar valores medidos. Algunas de las primeras unidades de medición, como el pie, se referían originalmente a partes del cuerpo humano. (Incluso en la actualidad el palmo se utiliza para medir la alzada de los caballos. Un palmo equivale a 4 pulgadas.) Si una unidad logra aceptación oficial, decimos que es una **unidad estándar**. Tradicionalmente, un organismo gubernamental o internacional establece las unidades estándar.

Un grupo de unidades estándar y sus combinaciones se denomina **sistema de unidades**. Actualmente se utilizan dos sistemas principales de unidades: el sistema métrico y el sistema inglés. Este último todavía se usa ampliamente en Estados Unidos; aunque prácticamente ha desaparecido en el resto del mundo, donde se sustituyó por el sistema métrico.

Podemos usar diferentes unidades del mismo sistema o unidades de sistemas distintos para describir la misma cosa. Por ejemplo, expresamos nuestra estatura en pulgadas, pies, centímetros, metros o incluso millas (aunque esta unidad no sería muy conveniente). Siempre es posible convertir de una unidad a otra, y hay ocasiones en que son necesarias tales conversiones. No obstante, lo mejor, y sin duda lo más práctico, es trabajar de forma consistente dentro del mismo sistema de unidades, como veremos más adelante.

1.2 Unidades SI de longitud, masa y tiempo

OBJETIVOS: *a*) Describir SI y *b*) especificar las referencias de las tres principales cantidades base en ese sistema.

La longitud, la masa y el tiempo son cantidades físicas fundamentales que describen muchas cantidades y fenómenos. De hecho, los temas de la mecánica (el estudio del movimiento y las fuerzas) que se cubren en la primera parte de este libro *tan sólo* requieren estas cantidades físicas. El sistema de unidades que los científicos usan para representar éstas y otras cantidades se basa en el sistema métrico.

Históricamente, el sistema métrico fue consecuencia de propuestas para tener un sistema más uniforme de pesos y medidas hechas, que se dieron en Francia durante los siglos XVII y XVIII. La versión moderna del sistema métrico se llama **sistema internacional de unidades**, que se abrevia oficialmente **SI** (del francés *Système International des Unités*).

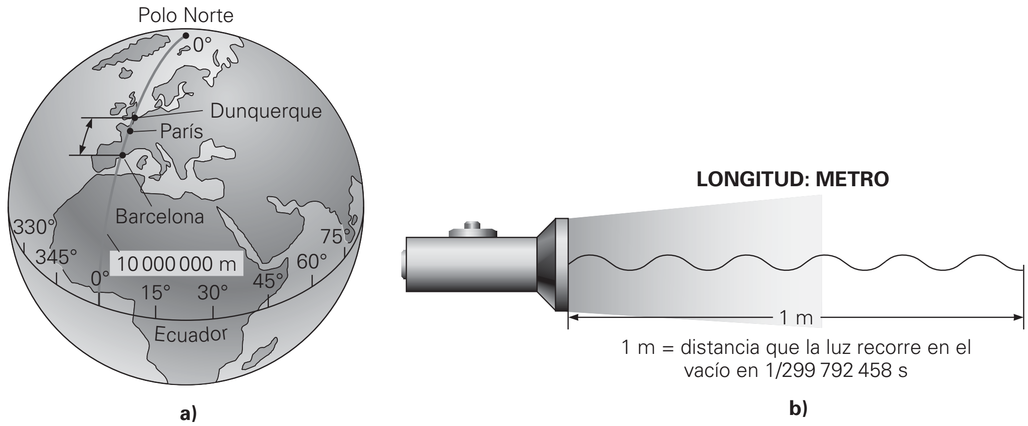
El SI incluye *cantidades base* y *cantidades derivadas*, que se describen con unidades base y unidades derivadas, respectivamente. Las **unidades base**, como el metro y el kilogramo, se representan con estándares. Las cantidades que se pueden expresar en términos de combinaciones de unidades base se llaman **unidades derivadas**. (Pensemos en cómo solemos medir la longitud de un viaje en kilómetros; y el tiempo que toma el viaje, en horas. Para expresar la rapidez con que viajamos, usamos la unidad derivada de kilómetros por hora, que representa distancia recorrida por unidad de tiempo, o longitud por tiempo.)

Uno de los refinamientos del SI fue la adopción de nuevas referencias estándar para algunas unidades base, como las de longitud y tiempo.

Longitud

La longitud es la cantidad base que usamos para medir distancias o dimensiones en el espacio. Por lo general decimos que longitud es la distancia entre dos puntos. Sin embargo, esa distancia dependerá de cómo se recorra el espacio entre los puntos, que podría ser con una trayectoria recta o curva.

La unidad SI de longitud es el **metro** (**m**). El metro se definió originalmente como 1/10 000 000 de la distancia entre el Polo Norte y el ecuador a lo largo de un meridia-



▲ **FIGURA 1.1 El estándar de longitud del SI: el metro** ***a)*** El metro se definió originalmente como 1/10 000 000 de la distancia entre el Polo Norte y el ecuador a lo largo de un meridiano que pasa por París, del cual se midió una porción entre Dunquerque y Barcelona. Se construyó una barra metálica (llamada metro de los archivos) como estándar. ***b)*** El metro se define actualmente en términos de la velocidad de la luz.

no que pasaba por París (▲figura 1.1a).* Se estudió una porción de este meridiano, entre Dunquerque, Francia y Barcelona, España, para establecer la longitud estándar, a la que se asignó el nombre *metre*, del vocablo griego *metron*, que significa "una medida". (La ortografía española es *metro*.) Un metro mide 39.37 pulgadas, poco más de una yarda.

La longitud del metro se conservó en un principio en forma de un estándar físico: la distancia entre dos marcas en una barra de metal (hecha de una aleación de platino-iridio) que se guardó en condiciones controladas y posteriormente se llamó metro de los archivos. Sin embargo, no es conveniente tener un estándar de referencia que cambia con las condiciones externas, como la temperatura. En 1983, el metro se redefinió en términos de un estándar más exacto, una propiedad de la luz que no varía: la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de 1/299 792 458 de segundo (figura 1.1b). En otras palabras, la luz viaja 299 792 458 metros en un segundo, y la velocidad de la luz en el vacío se define como $c = 299\ 792\ 458$ m/s (c es el símbolo común para la velocidad de la luz). Observe que el estándar de longitud hace referencia al tiempo, que se puede medir con gran exactitud.

Masa

La masa es la cantidad base con que describimos cantidades de materia. Cuanto mayor masa tiene un objeto, contendrá más materia. (Veremos más análisis de la masa en los capítulos 4 y 7.)

La unidad de masa en el SI es el **kilogramo** (**kg**), el cual se definió originalmente en términos de un volumen específico de agua; aunque ahora se remite a un estándar material específico: la masa de un cilindro prototipo de platino-iridio que se guarda en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Sèvres, Francia (▸figura 1.2). Estados Unidos tiene un duplicado del cilindro prototipo. El duplicado sirve como referencia para estándares secundarios que se emplean en la vida cotidiana y en el comercio. Es posible que a final de cuentas el kilogramo se vaya a remitir a algo diferente de un estándar material.

* Note que este libro y la mayoría de los físicos han adoptado la práctica de escribir los números grandes separando grupos de tres dígitos con un espacio fino: por ejemplo, 10 000 000 (no 10,000,000). Esto se hace para evitar confusiones con la práctica europea de usar la coma como punto decimal. Por ejemplo, 3.141 en México se escribiría 3,141 en Europa. Los números decimales grandes, como 0.537 84, también podrían separarse, por consistencia. Suelen usarse espacios en números que tienen más de cuatro dígitos antes o después del punto decimal.

Quizás usted haya notado que en general se usa la frase *pesos y medidas* en vez de *masas y medidas*. En el SI, la masa es una cantidad base; pero en el sistema inglés se prefiere usar el peso para describir cantidades de masa, por ejemplo, peso en libras en vez de masa en kilogramos. El peso de un objeto es la atracción gravitacional que la Tierra ejerce sobre el objeto. Por ejemplo, cuando nos pesamos en una báscula, nuestro peso es una medida de la fuerza gravitacional descendente que la Tierra ejerce sobre nosotros. Podemos usar el peso como una medida de la masa porque, cerca de la superficie terrestre, la masa y el peso son directamente proporcionales entre sí.

No obstante, tratar el peso como una cantidad base crea algunos problemas. Una cantidad base debería tener el mismo valor en cualquier parte. Esto se cumple para la masa: un objeto tiene la misma masa, o cantidad de materia, esté donde esté. *Sin embargo, no se cumple para el peso.* Por ejemplo, el peso de un objeto en la Luna es menor que su peso en la Tierra. Ello se debe a que la Luna tiene una masa menor que la de la Tierra y, por ello, la atracción gravitacional que la Luna ejerce sobre un objeto (es decir, el peso del objeto) es menor que la que ejerce la Tierra. Es decir, un objeto con cierta cantidad de masa tiene un peso dado en la Tierra, aunque en la Luna la misma cantidad de masa pesaría cuando mucho cerca de una sexta parte. Asimismo, el peso de un objeto varía según los diferentes planetas.

Por ahora, tengamos presente que en un lugar específico, como la superficie de la tierra, *el peso está relacionado con la masa, pero no son lo mismo.* Puesto que el peso de un objeto que tiene cierta masa varía dependiendo del lugar donde esté, resulta mucho más útil tomar la masa como cantidad base, como en el SI. Las cantidades base deberían mantenerse constantes independientemente de dónde se midan, en condiciones normales o estándar. La distinción entre masa y peso se explicará más a fondo en un capítulo posterior. Hasta entonces, nos ocuparemos básicamente de la masa.

Tiempo

El tiempo es un concepto difícil de definir. Una definición común es que el tiempo es el flujo continuo de sucesos hacia adelante. Este enunciado no es tanto una definición sino una observación de que nunca se ha sabido que el tiempo vaya hacia atrás, como sucedería cuando vemos una película en que el proyector funciona en reversa. A veces se dice que el tiempo es una cuarta dimensión que acompaña a las tres dimensiones del espacio (x, y, z, t), de tal manera que si algo existe en el espacio, también existe en el tiempo. En cualquier caso, podemos usar sucesos para tomar mediciones del tiempo. Los sucesos son análogos a las marcas en un metro que se utilizan para medir longitudes. (Véase A fondo 1.2 sobre ¿qué es el tiempo?)

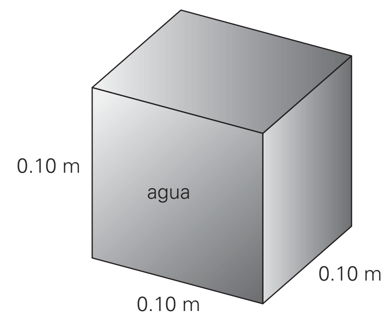
La unidad SI del tiempo es el **segundo** (**s**). Originalmente se usó el "reloj" solar para definir el segundo. Un día solar es el intervalo de tiempo que transcurre entre dos cruces sucesivos de la misma línea de longitud (meridiano) efectuados por el Sol. Se fijó un segundo como 1/86 400 de este día solar aparente (1 día = 24 h = 1440 min = 86 400 s). Sin embargo, el trayecto elíptico que sigue la Tierra en torno al Sol hace que varíe la duración de los días solares aparentes.

Para tener un estándar más preciso, se calculó un día solar promedio a partir de la duración de los días solares aparentes durante un año solar. En 1956, el segundo se remitió a ese día solar medio. Sin embargo, el día solar medio no es exactamente el mismo en todos los periodos anuales, a causa de las variaciones menores en los movimientos terrestres y a la lenta disminución de su tasa de rotación originada por la fricción de las mareas. Por ello, los científicos siguieron buscando algo mejor.

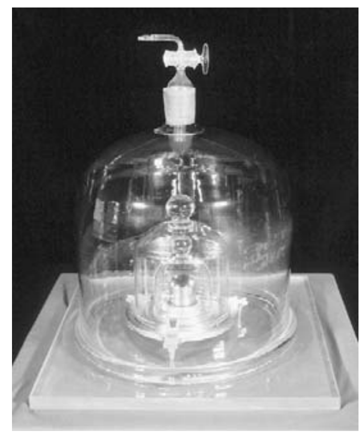
En 1967, un estándar atómico se adoptó una mejor referencia. El segundo se definió en términos de la frecuencia de radiación del átomo de cesio 133. Este "reloj atómico" usaba un haz de átomos de cesio para mantener el estándar de tiempo, con una variación de aproximadamente un segundo cada 300 años. En 1999 se adoptó otro reloj atómico de cesio 133, el reloj atómico de fuente que, como su nombre indica, se basa en la frecuencia de radiación de una fuente de átomos de cesio, en vez de un haz (▼figura 1.3). La variación de este reloj es de ¡menos de un segundo cada 20 millones de años!*

* Se está desarrollando un reloj aún más preciso: el reloj atómico totalmente óptico, así llamado porque utiliza tecnología láser y mide el intervalo de tiempo más corto jamás registrado, que es 0.000 01. El nuevo reloj no utiliza átomos de cesio, sino un solo ion enfriado de mercurio líquido vinculado a un oscilador láser. La frecuencia del ion de mercurio es 100 000 veces más alta que la de los átomos de cesio, de ahí lo corto y preciso del intervalo de tiempo.

MASA: KILOGRAMO



a)



b)

▲ **FIGURA 1.2 El estándar de masa del SI: el kilogramo** ***a)*** El kilogramo se definió originalmente en términos de un volumen específico de agua, un cubo de 0.10 m por lado, con lo que se asoció el estándar de masa con el estándar de longitud. ***b)*** Ahora el kilogramo estándar se define con un cilindro metálico. El prototipo internacional del kilogramo se conserva en la Oficina Francesa de Pesos y Medidas. Se le fabricó en la década de 1880 con una aleación de 90% platino y 10% iridio. Se han producido copias para usarse como prototipos nacionales de 1 kg, uno de los cuales es el estándar de masa de Estados Unidos, que se guarda en el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST) en Gaithersburg, MD.

A FONDO 1.2 ¿QUÉ ES EL TIEMPO?

Durante siglos, la pregunta ¿qué es el tiempo? ha generado debates, y las respuestas a menudo han tenido un carácter filosófico. Pero la definición del tiempo todavía resulta evasiva en cierto grado. Si a usted se le pidiera definir el tiempo o explicarlo, ¿qué diría? Las definiciones generales parecen un tanto vagas. Por lo común, decimos:

> El tiempo es el flujo continuo y hacia delante de los sucesos.

Otras ideas en torno al tiempo incluyen las siguientes. Platón, el filósofo griego observaba:

> El Sol, la Luna y … los planetas fueron creados para definir y preservar los números del tiempo.

San Agustín también ponderaba el tiempo:

> ¿Qué es el tiempo? Si nadie pregunta, lo sé; si quiero explicarlo a quien pregunta, no lo sé.

Marco Aurelio, el filósofo y emperador romano, escribió:

> El tiempo es una especie de río de los hechos que suceden, y su corriente es fuerte.

El Sombrerero Loco, el personaje de *Alicia en el país de las maravillas*, de Lewis Carroll, creía saber lo que era el tiempo:

> Si tú conocieras el Tiempo tan bien como yo, no hablarías de desperdiciarlo… Ahora, si tan sólo estuvieras en buenos términos con él, haría casi cualquier cosa que tú quisieras con el reloj. Por ejemplo, supón que fueran las nueve de la mañana, la hora de comenzar las clases; sólo tendrías que susurrar una indicación al Tiempo, y allá iría el reloj en un abrir y cerrar de ojos; a la una y media, la hora del almuerzo.

El flujo "hacia delante" del tiempo implica una dirección, y esto se describe en ocasiones como la *flecha del tiempo*. Los acontecimientos no suceden como parece cuando un proyector de películas se pone en marcha hacia atrás. Si se agrega leche fría al café negro y caliente, se obtiene una mezcla de color café claro que se puede beber; pero no es posible obtener leche fría y café negro y caliente a partir de esa misma mezcla de color café. Así es la flecha irreversible de un proceso físico (y del tiempo): nunca se podría revertir el proceso para obtener un ingrediente frío y otro caliente. Esta flecha del tiempo se describirá en el capítulo 12 en términos de entropía, que indica cómo "fluirá" un proceso termodinámico.

La pregunta ¿qué es el tiempo? nos ayuda a comprender lo que significa una cantidad física *fundamental*, como la masa, la longitud o el tiempo mismo. Básicamente, éstas son las propiedades más simples de lo que pensaríamos para describir la naturaleza. Así que la respuesta más segura es:

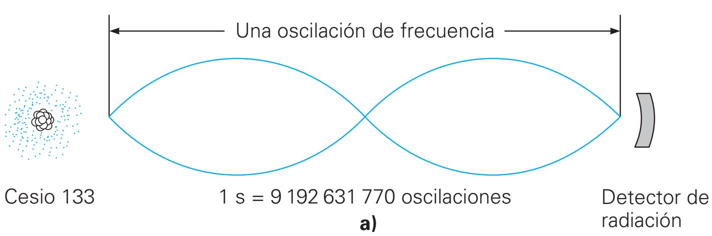
> El tiempo es una cantidad física fundamental.

Esto, en cierto forma, enmascara nuestra ignorancia, y la física continúa a partir de ahí, utilizando el tiempo para describir y explicar lo que observamos.

Unidades base del SI

El SI tiene siete *unidades base* para siete cantidades base, las cuales se supone que son mutuamente independientes. Además del metro, el kilogramo y el segundo para 1. longitud, 2. masa y 3. tiempo, las unidades SI incluyen 4. corriente eléctrica (carga/segundo) en amperes (A), 5. temperatura en kelvin (K), 6. cantidad de sustancia en moles (mol) y 7. intensidad luminosa en candelas (cd). Véase la tabla 1.1.

Se cree que las cantidades mencionadas constituyen el número mínimo de cantidades base necesarias para describir cabalmente todo lo que se observa o mide en la naturaleza.



▲ **FIGURA 1.3 El estándar de tiempo en el SI: el segundo** El segundo se definió una vez en términos del día solar promedio. ***a)*** Ahora se define con base en la frecuencia de la radiación asociada con una transición atómica. ***b)*** El "reloj" atómico de fuente que se muestra aquí, en el NIST, es el estándar de tiempo para Estados Unidos. La variación de este reloj es de menos de un segundo cada 20 millones de años.

TABLA 1.1 Las siete unidades base del SI

Nombre de la unidad (abreviatura)	*Propiedad medida*
metro (m)	longitud
kilogramo (kg)	masa
segundo (s)	tiempo
ampere (A)	corriente eléctrica
kelvin (K)	temperatura
mol (mol)	cantidad de sustancia
candela (cd)	intensidad luminosa

1.3 Más acerca del sistema métrico

OBJETIVOS: Aprender a usar *a*) prefijos métricos y *b*) unidades métricas no estándares.

El sistema métrico que incluye las unidades estándar de longitud, masa y tiempo, ahora incorporados en el SI, en otros tiempos se conocía como **sistema mks** (por *m*etro-*k*ilogramo-*s*egundo). Otro sistema métrico que se ha usado para manejar cantidades relativamente pequeñas es el **sistema cgs** (por *c*entímetro-*g*ramo-*s*egundo). En Estados Unidos, el sistema que se sigue usando generalmente es el sistema inglés de ingeniería, en el cual las unidades estándar de longitud, masa y tiempo son pie, slug y segundo, respectivamente. Tal vez el lector no haya oído hablar del slug porque, como ya dijimos, suele utilizarse la fuerza gravitacional (peso) en lugar de la masa —libras en vez de slugs— para describir cantidades de materia. Por ello, el sistema inglés también se conoce como **sistema fps** (por *f*oot[pie]-*p*ound[libra]-*s*econd[segundo]).

El sistema métrico predomina en todo el mundo y cada vez se está usando más en Estados Unidos. Gracias a su sencillez matemática, es el sistema de unidades preferido en ciencia y tecnología. Usaremos unidades SI en casi todo este libro. Todas las cantidades se pueden expresar en unidades SI. No obstante, algunas unidades de otros sistemas se aceptan para usos limitados por cuestiones prácticas; por ejemplo, la unidad de tiempo hora y la unidad de temperatura grado Celsius. En los primeros capítulos usaremos ocasionalmente unidades inglesas con fines comparativos, ya que en varios países esas unidades se siguen usando en actividades cotidianas y en muchas aplicaciones prácticas.

El creciente uso del sistema métrico en todo el mundo implica que debemos familiarizarnos con él. Una de sus mayores ventajas es que se trata de un sistema decimal, es decir, de base 10. Esto implica que se obtienen unidades más grandes o más pequeñas multiplicando o dividiendo, respectivamente, una unidad base por potencias de 10. En la tabla 1.2 se presenta una lista de algunos múltiplos de unidades métricas y sus prefijos correspondientes.

TABLA 1.2 Algunos múltiplos y prefijos de unidades métricas*

Múltiplo†	*Prefijo (y abreviatura)*	*Múltiplo*†	*Prefijo (y abreviatura)*
10^{12}	tera- (T)	$\mathbf{10^{-2}}$	**centi- (c)**
10^{9}	giga- (G)	$\mathbf{10^{-3}}$	**mili- (m)**
$\mathbf{10^{6}}$	**mega- (M)**	$\mathbf{10^{-6}}$	**micro- (μ)**
$\mathbf{10^{3}}$	**kilo- (k)**	10^{-9}	nano- (n)
10^{2}	hecto- (h)	10^{-12}	pico- (p)
10	deca- (da)	10^{-15}	femto- (f)
10^{-1}	deci- (d)	10^{-18}	atto- (a)

*Por ejemplo, 1 gramo (g) multiplicado por 1000 (que es 10^3) es 1 kilogramo (kg); 1 gramo multiplicado por 1/1000 (que es 10^{-3}) es 1 miligramo (mg).

†Los prefijos de uso más común están en negritas. Observe que las abreviaturas de los múltiplos 10^6 y mayores son mayúsculas, en tanto que las abreviaturas de los múltiplos más pequeños son minúsculas.

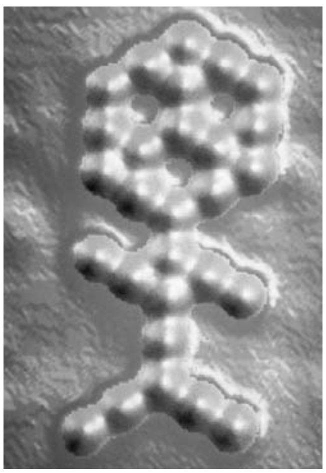
PHYSLET®
Ilustración 1.2 Animaciones, unidades y mediciones

En mediciones decimales, los prefijos *micro-*, *mili-*, *centi-*, *kilo-* y *mega-* son los más comúnmente usados; por ejemplo, microsegundo (μs), milímetro (mm), centímetro (cm), kilogramo (kg) y megabyte (MB), como en la capacidad de almacenamiento de un CD o un disco de computadora. La característica decimal del sistema métrico facilita la conversión de medidas de un tamaño de unidad métrica a otro. En el sistema inglés se deben usar diferentes factores de conversión, como 16 para convertir libras a onzas, y 12 para convertir pies en pulgadas. El sistema inglés se desarrolló históricamente y de forma no muy científica.

Un sistema base 10 que sí se usa generalmente en Estados Unidos es el monetario. Así como un metro se puede dividir en 10 decímetros, 100 centímetros o 1000 milímetros, la "unidad base" dólar se puede dividir en 10 "decidólares" (monedas de diez), 100 "centidólares" (centavos) o 1000 "milidólares" (décimas de centavo, que se usan para calcular impuestos prediales y gravámenes a los bonos). Puesto que todos los prefijos métricos son potencias de 10, no hay análogos métricos para las monedas de 5 y 25 centavos de dólar.

Los prefijos métricos oficiales ayudan a evitar confusiones. En Estados Unidos, por ejemplo, billion es mil millones (10^9); en tanto que en el mundo hispanoparlante y en Gran Bretaña, un billón es un millón de millones (10^{12}). El uso de prefijos métricos elimina confusiones, porque *giga-* indica 10^9 y *tera-* indica 10^{12}. Quizá ya haya oído hablar sobre *nano-*, un prefijo que indica 10^{-9}, y la nanotecnología.

En general, nanotecnología es cualquier tecnología que se practica a escala de nanómetros. Un nanómetro es una milmillonésima (10^{-9}) de un metro, aproximadamente la anchura de tres o cuatro átomos. Básicamente, la nanotecnología implica la fabricación o construcción de cosas átomo por átomo o molécula por molécula, así que el nanómetro es la escala adecuada. ¿Un átomo o una molécula a la vez? Esto parecería inverosímil, pero no lo es (véase la ◂figura 1.4).



▲ **FIGURA 1.4** Hombre molecular Esta figura se creó desplazando 28 moléculas, una por una. Cada saliente es la imagen de una molécula de monóxido de carbono. Las moléculas descansan en la superficie de un solo cristal de platino. El "hombre molecular" mide 5 nm de alto y 2.5 nm de ancho (de una mano a la otra). Se necesitarían más de 20 000 figuras como ésta, unidas de la mano, para abarcar un solo cabello humano. Las moléculas de la figura se acomodaron empleando un microscopio especial a temperaturas muy bajas.

Son bien conocidas las propiedades químicas de los átomos y las moléculas. Por ejemplo, al reordenar los átomos de la hulla podría producirse un diamante. (Somos capaces de lograrlo sin la nanotecnología, usando calor y presión.) La nanotecnología presenta la posibilidad de construir novedosos dispositivos o "máquinas" moleculares con propiedades y capacidades extraordinarias; por ejemplo en medicina. Las nanoestructuras podrían inyectarse al cuerpo e ir a un sitio específico, como un crecimiento canceroso, y suministrar directamente ahí un fármaco, de manera que otros órganos del cuerpo quedaran exentos de los efectos del medicamento. (Este proceso podría considerarse nanoquimioterapia.)

Aunque sea un tanto difícil comprender o visualizar el nuevo concepto de nanotecnología, tenga en mente que un nanómetro es una milmillonésima parte de un metro. El diámetro de un cabello humano mide aproximadamente 200 000 nanómetros, algo enorme en comparación con las nuevas nanoaplicaciones. El futuro nos depara una emocionante nanoera.

Volumen

En el SI, la unidad estándar de volumen es el metro cúbico (m^3): la unidad tridimensional derivada de la unidad base, el metro. Dado que esta unidad es bastante grande, a menudo resulta más conveniente usar la unidad no estándar de volumen (o capacidad) de un cubo de 10 cm (centímetros) por lado. Este volumen lleva el nombre de *litro* y se abrevia con **L**. El volumen de un litro es 1000 cm^3 (10 cm $\times$ 10 cm $\times$ 10 cm). Puesto que 1 L = 1000 mL (mililitros), se sigue que 1 mL = 1 cm^3. Véase la ▸figura 1.5a. [El centímetro cúbico a veces se abrevia cc, sobre todo en química y biología. Asimismo, el milímetro a veces se abrevia como ml, pero se prefiere la L mayúscula (mL) para que no haya confusión con el número uno.]

Nota: el *litro* a veces se abrevia con una "ele" minúscula (l), pero se prefiere una "ele" mayúscula (L) para que no se confunda con el número uno. (¿No es 1 L más claro que 1 l?)

De la figura 1.2 recordemos que la unidad estándar de masa, el kilogramo, se definió originalmente como la masa de un volumen cúbico de agua de 10 cm (0.10 m) de lado, es decir, la masa de un litro de agua.* Esto es, *1 L de agua tiene una masa de 1 kg*

* Esto se especifica a 4°C. El volumen del agua cambia ligeramente con la temperatura (expansión térmica, capítulo 10). Para nuestros propósitos, consideraremos que el volumen del agua permanece constante bajo condiciones normales de temperatura.

(figura 1.5b). También, dado que 1 kg = 1000 g y 1 L = 1000 cm^3, entonces *1 cm^3 (o 1 mL) de agua tiene una masa de 1 g.*

Ejemplo 1.1 ■ La tonelada métrica: otra unidad de masa

Como vimos, la unidad métrica de masa originalmente estaba relacionada con el estándar de longitud, pues un litro (1000 cm^3) de agua tenía una masa de 1 kg. La unidad métrica estándar de volumen es el metro cúbico (m^3), y este volumen de agua se usó para definir una unidad más grande de masa llamada *tonelada métrica*. ¿A cuántos kilogramos equivale una tonelada métrica?

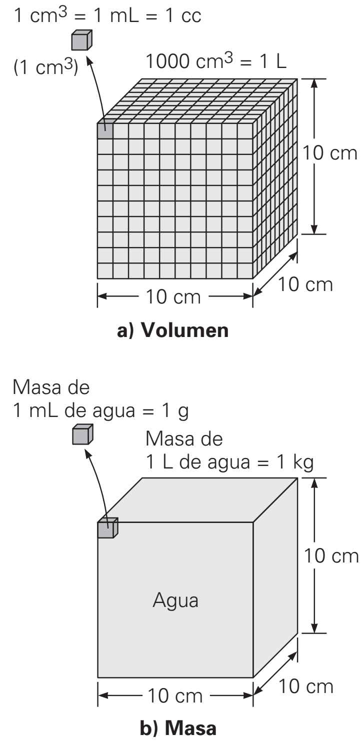
Razonamiento. Un metro cúbico es un volumen relativamente grande y contiene una gran cantidad de agua (más de una yarda cúbica; ¿por qué?). La clave es averiguar cuántos volúmenes cúbicos de 10 cm por lado (litros) hay en un metro cúbico. Por tanto, esperaremos un número grande.

Solución. Cada litro de agua tiene una masa de 1 kg, así que deberemos averiguar cuántos litros hay en 1 m^3. Puesto que un metro tiene 100 cm, un metro cúbico simplemente es un cubo con lados de 100 cm. Por lo tanto, un metro cúbico (1 m^3) tiene un volumen de 10^2 cm $\times$ 10^2 cm $\times$ 10^2 cm = 10^6 cm^3. Puesto que 1 L = 10^3 cm^3, deberá haber (10^6 cm^3)/(10^3 cm^3/L) = 1000 L en 1 m^3. Por lo tanto, 1 tonelada métrica equivale a 1000 kg.

Cabe señalar que todo el razonamiento se puede expresar de forma muy concisa con un solo cálculo:

$$\frac{1\ \text{m}^3}{1\ \text{L}} = \frac{100\ \text{cm} \times 100\ \text{cm} \times 100\ \text{cm}}{10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}} = 1000 \quad \text{o} \quad 1\ \text{m}^3 = 1000\ \text{L}$$

Ejercicio de refuerzo. ¿Cuál sería la longitud de los lados de un cubo que contenga una kilotonelada métrica de agua? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)*



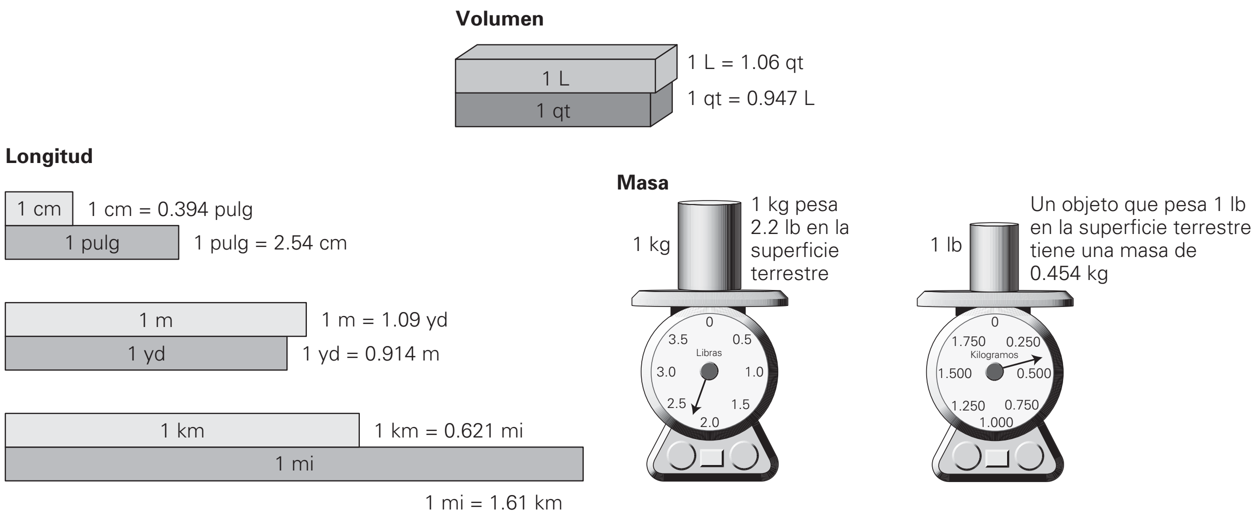
▲ **FIGURA 1.5 El litro y el kilogramo** Otras unidades métricas se derivan del metro. ***a)*** Una unidad de volumen (capacidad) es el volumen de un cubo de 10 cm (0.01 m) por lado, y se llama *litro* (L). ***b)*** La masa de un litro de agua se definió como 1 kg. Observe que el cubo de decímetro contiene 1000 cm^3, o 1000 mL. Así, 1 cm^3, o 1 mL, de agua tiene una masa de 1 g.

Los estadounidenses podrían estar más familiarizados con el litro de lo que pensamos, ya que su uso se está extendiendo en ese país, como muestra la ▼figura 1.6.

Aunque el sistema inglés cada vez se usa menos, podría ser útil tener una idea de la relación entre las unidades métricas e inglesas. Los tamaños relativos de algunas unidades se ilustran en la ▶figura 1.7. En breve trataremos la conversión matemática de una unidad a otra.

◀ **FIGURA 1.6 Dos, tres, uno y medio litro** El litro ya es una unidad de volumen común en las bebidas gaseosas.

* La sección de Respuestas a ejercicios de refuerzo que sigue a los apéndices contiene las respuestas y, en el caso de Ejercicios conceptuales, el razonamiento, de todos los Ejercicios de refuerzo de este libro.



▲ **FIGURA 1.7 Comparación de algunas unidades SI e inglesas** Las barras ilustran la magnitud relativa de cada par de unidades. (*Nota:* las escalas de comparación son diferentes en cada caso.)

1.4 Análisis de unidades

OBJETIVOS: Explicar las ventajas del análisis de unidades y aplicarlo.

Las cantidades fundamentales, o base, empleadas en las descripciones físicas se llaman *dimensiones*. Por ejemplo, la longitud, la masa y el tiempo son dimensiones. Podríamos medir la distancia entre dos puntos y expresarla en unidades de metros, centímetros o pies; pero la cantidad tendría la dimensión de longitud en los tres casos.

Las dimensiones brindan un procedimiento mediante el cual es posible verificar la consistencia de las ecuaciones. En la práctica, resulta conveniente utilizar unidades específicas, como m, s y kg. (Véase la tabla 1.3.) Tales unidades pueden considerarse cantidades algebraicas y cancelarse. El empleo de unidades para verificar ecuaciones se llama **análisis unitario**, y muestra la consistencia de las unidades y si una ecuación es dimensionalmente correcta.

Usted seguramente habrá usado ecuaciones y sabrá que una ecuación es una igualdad matemática. Puesto que las cantidades físicas empleadas en las ecuaciones tienen unidades, *los dos miembros de una ecuación deben ser iguales no sólo en valor numérico, sino también en unidades (dimensiones)*. Por ejemplo, supongamos que tenemos las cantidades de longitud $a = 3.0$ m y $b = 4.0$ m. Si insertamos estos valores en la ecua-

TABLA 1.3 Algunas unidades de cantidades comunes

Cantidad	*Unidad*
masa	kg
tiempo	s
longitud	m
área	m^2
volumen	m^3
velocidad (v)	$\frac{m}{s}$
aceleración (a o g)	$\frac{m}{s^2}$

ción $a \times b = c$, obtendremos 3.0 m $\times$ 4.0 m = 12.0 m^2. Ambos lados de la ecuación son numéricamente iguales ($3 \times 4 = 12$) y tienen las mismas unidades: m $\times$ m = m^2 (longitud)^2. Si una ecuación es correcta según el análisis de unidades, deberá ser dimensionalmente correcta. El ejemplo 1.2 ilustra el uso del análisis de unidades.

Ejemplo 1.2 ■ Comprobación de dimensiones: análisis de unidades

Un profesor anota dos ecuaciones en el pizarrón: *a*) $v = v_o + at$ y *b*) $x = v/2a$, donde x es una distancia en metros (m); v y v_o son velocidades en metros/segundo (m/s); a es aceleración en (metros/segundo)/segundo, o sea, metros/segundo^2 (m/s^2), y t es tiempo en segundos (s). ¿Las ecuaciones son dimensionalmente correctas? Averígüelo mediante el análisis de unidades.

Razonamiento. Simplemente insertamos las unidades de las cantidades en cada ecuación, cancelamos y verificamos las unidades en ambos miembros.

Solución.

***a*)** La ecuación es

$$v = v_o + at$$

Al insertar las unidades de las cantidades físicas tenemos (tabla 1.3)

$$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} + \left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \times \mathrm{s}\right) \quad \text{o} \quad \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} + \left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s} \times \cancel{\mathrm{s}}} \times \cancel{\mathrm{s}}\right)$$

Observe que las unidades se cancelan como los números en una fracción. Entonces, tenemos

$$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} + \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \quad \textit{(dimensionalmente correcto)}$$

La ecuación es dimensionalmente correcta, ya que las unidades de cada miembro son metros por segundo. (La ecuación también es una relación correcta, como veremos en el capítulo 2.)

***b*)** Por análisis de unidades, la ecuación

$$x = \frac{v}{2a}$$

es

$$\mathrm{m} = \frac{\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)}{\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\right)} = \frac{\cancel{\mathrm{m}}}{\cancel{\mathrm{s}}} \times \frac{\mathrm{s}^{\cancel{2}}}{\cancel{\mathrm{m}}} \quad \text{o} \quad \mathrm{m} = \mathrm{s} \quad \textit{(dimensionalmente incorrecta)}$$

El metro (m) no pueden ser igual al segundo (s), así que, en este caso, la ecuación es dimensionalmente incorrecta (longitud $\neq$ tiempo) y, por lo tanto, tampoco es físicamente correcta.

Ejercicio de refuerzo. ¿La ecuación $ax = v^2$ es dimensionalmente correcta? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

El análisis de unidades nos dice si una ecuación es dimensionalmente correcta, pero una ecuación con consistencia dimensional no necesariamente expresa correctamente la verdadera relación entre las cantidades. Por ejemplo, en términos de unidades,

$$x = at^2$$

es

$$\mathrm{m} = (\mathrm{m/s^2})(\mathrm{s^2}) = \mathrm{m}$$

La ecuación es dimensionalmente correcta (longitud = longitud) pero, como veremos en el capítulo 2, no es físicamente correcta. La forma correcta de la ecuación —tanto en lo dimensional como en lo físico— es $x = \frac{1}{2}at^2$. (La fracción $\frac{1}{2}$ no tiene dimensiones; es un número adimensional.) El análisis de unidades no nos indica si una ecuación es correcta, sino tan sólo si es dimensionalmente consistente o no.

Unidades mixtas

El análisis de unidades también nos permite verificar si se están empleando unidades mixtas. En general, al resolver problemas es recomendable usar siempre el mismo sistema de unidades y la misma unidad para una dimensión dada a lo largo del ejercicio.

Por ejemplo, suponga que quiere comprar una alfombra que se ajuste a una área rectangular y mide los lados como 4.0 yd × 3.0 m. El área de la alfombra entonces sería $A = l \times w = 4.0 \text{ yd} \times 3.0 \text{ m} = 12 \text{ yd} \cdot \text{m}$, que confundiría al dependiente de la tienda de alfombras. Observe que esta ecuación es dimensionalmente correcta (longitud)^2 = (longitud)^2; pero las unidades son inconsistentes o están mezcladas. Así, el análisis de unidades señalará *unidades mixtas*. Note que es posible que una ecuación sea dimensionalmente correcta, incluso si las unidades son mixtas.

Veamos unidades mixtas en una ecuación. Suponga que usamos centímetros como unidad de x en la ecuación

$$v^2 = v_o^2 + 2ax$$

y que las unidades de las demás cantidades son las del ejemplo 1.2. En términos de unidades, esta ecuación daría

$$\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + \left(\frac{\text{m} \times \text{cm}}{\text{s}^2}\right)$$

es decir,

$$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + \frac{\text{m} \times \text{cm}}{\text{s}^2}$$

que es dimensionalmente correcto, (longitud)^2/(tiempo)^2, en ambos lados de la ecuación. Pero las unidades son mixtas (m y cm). Los términos del lado derecho no deben sumarse sin convertir primero los centímetros a metros.

Cómo determinar las unidades de cantidades

Otro aspecto del análisis de unidades, que es muy importante en física, es la determinación de las unidades de cantidades a partir de las ecuaciones que las definen. Por ejemplo, la **densidad** (representada por la letra griega rho, ρ) se define con la ecuación

$$\boxed{\rho = \frac{m}{V}} \quad \textit{(densidad)} \tag{1.1}$$

donde m es masa y V es volumen. (La densidad es la masa de un objeto o sustancia por unidad de volumen, e indica qué tan compacta es esa masa.) ¿Qué unidades tiene la densidad? En el SI, la masa se mide en kilogramos; y el volumen, en metros cúbicos. Por lo tanto, la ecuación definitoria

$$\rho = \text{m}/V \quad (\text{kg/m}^3)$$

da la unidad derivada para la densidad: kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) en el SI.

¿Qué unidades tiene π? La relación entre la circunferencia (c) y el diámetro (d) de un círculo está dada por la ecuación $c = \pi d$, así que $\pi = c/d$. Si la longitud se mide en metros, entonces

$$\pi = \frac{c}{d}\left(\frac{\cancel{\text{m}}}{\cancel{\text{m}}}\right)$$

Así pues, la constante π no tiene unidades, porque se cancelan. Es una constante adimensional con muchos dígitos, como vimos en la sección Hechos de física al inicio de este capítulo.

1.5 Conversión de unidades

OBJETIVOS: *a*) Explicar las relaciones del factor de conversión y *b*) aplicarlas para convertir unidades dentro de un sistema o de un sistema de unidades a otro.

Como las unidades de diferentes sistemas, o incluso diferentes unidades dentro del mismo sistema, pueden expresar la misma cantidad, a veces es necesario convertir las unidades de una cantidad a otra unidad. Por ejemplo, quizá tengamos que convertir pies en yardas o pulgadas en centímetros. Usted ya sabe cómo efectuar muchas conversiones de unidades. Si una habitación mide 12 ft de largo, ¿qué longitud tiene en yardas? La respuesta inmediata es 4 yd.

¿Cómo hizo esta conversión? Para ello es necesario conocer una relación entre las unidades pie y yardas. El lector sabe que 3 ft = 1 yd. Esto se denomina *enunciado de equivalencia*. Como vimos en la sección 1.4, los valores numéricos y las unidades deben ser iguales en ambos lados de una ecuación. En los enunciados de equivalencia, solemos utilizar un signo de igual para indicar que 1 yd y 3 ft representan la misma *longitud*, o una *longitud equivalente.* Los números son distintos porque están en diferentes *unidades* de longitud.

Matemáticamente, si queremos cambiar de unidades, usamos **factores de conversión**, que son enunciados de equivalencia expresados en forma de cocientes; por ejemplo, 1 yd/3 ft o 3 ft/1 yd. (Por conveniencia es común omitir el "1" en el denominador de tales cocientes; por ejemplo, 3 ft/yd.) Para comprender la utilidad de tales cocientes, observe la expresión 1 yd = 3 ft en la forma:

$$\frac{1\text{ yd}}{3\text{ ft}} = \frac{3\text{ ft}}{3\text{ ft}} = 1 \qquad \text{o} \qquad \frac{3\text{ ft}}{1\text{ yd}} = \frac{1\text{ yd}}{1\text{ yd}} = 1$$

Como se aprecia en estos ejemplos, el valor real de un factor de conversión es 1, y podemos multiplicar cualquier cantidad por 1 sin que se alteren su valor ni su magnitud. Por lo tanto, *un factor de conversión simplemente nos permite expresar una cantidad en términos de otras unidades sin alterar su valor ni su magnitud física*.

La forma en que convertimos 12 pies en yardas se expresa matemáticamente como:

$$12\ \cancel{\text{ft}} \times \frac{1\text{ yd}}{3\ \cancel{\text{ft}}} = 4\text{ yd} \qquad \textit{(las unidades de cancelan)}$$

Si usamos el factor de conversión adecuado, las unidades se cancelarán, como indican las rayas diagonales, de manera que el análisis de unidades es correcto, yd = yd.

Supongamos que nos piden convertir 12.0 pulgadas a centímetros. Tal vez en este caso no conozcamos el factor de conversión; pero podríamos obtenerlo de una tabla (como la que viene en los forros de este libro) que da las relaciones necesarias: 1 pulg = 2.54 cm o 1 cm = 0.394 pulg. No importa cuál de estos enunciados de equivalencia utilicemos. La cuestión, una vez que hayamos expresado el enunciado de equivalencia como factor de conversión, es si debemos multiplicar por ese factor o dividir entre él para efectuar la conversión. *Al convertir unidades, hay que aprovechar el análisis de unidades*; es decir, hay que dejar que las unidades determinen la forma adecuada del factor de conversión.

Observe que el enunciado de equivalencia 1 pulg = 2.54 cm puede dar pie a dos formas del factor de conversión: 1 pulg/2.54 cm o 2.54 cm/1 pulg. Al convertir pulg a cm, la forma apropiada para multiplicar es 2.54 cm/pulg. Al convertir centímetros a pulgada, debemos usar la forma 1 pulg/2.54 cm. (Se podrían usar las formas inversas en cada caso; pero las cantidades tendrían que *dividirse* entre los factores de conversión para que las unidades se cancelen correctamente.) En general, en todo este libro usaremos la forma de los factores de conversión por la que se multiplica.

Unos cuantos enunciados de equivalencia de uso común no son dimensional ni físicamente correctos; por ejemplo, considere 1 kg = 2.2 lb, que se usa para determinar rápidamente el peso de un objeto que está cerca de la superficie de la Tierra, dada su masa. El kilogramo es una unidad de masa; y la libra, una unidad de peso. Esto implica que 1 kg *equivale* a 2.2 lb; es decir, una *masa* de 1 kg tiene un *peso* de 2.2 lb. Puesto que la masa y el peso son directamente proporcionales, podemos usar el factor de conversión dimensionalmente incorrecto 1 kg/2.2 lb (pero *únicamente* cerca de la superficie terrestre).

Nota: 1 kg de masa tiene un peso equivalente de 2.2 lb cerca de la superficie de la Tierra.

a)

b)

▲ **FIGURA 1.8 Conversión de unidades** Algunos letreros indican unidades tanto inglesas como métricas, como éstos que dan altitud y rapidez.

Ejemplo 1.3 ■ Conversión de unidades: uso de factores de conversión

a) Un jugador de baloncesto tiene 6.5 ft de estatura. ¿Qué estatura tiene en metros? *b*) ¿Cuántos segundos hay en un mes de 30 días? *c*) ¿Cuánto es 50 mi/h en metros por segundo? (Véase la tabla de factores de conversión en los forros de este libro.)

Razonamiento. Si usamos los factores de conversión correctos, el resto es sólo aritmética.

Solución.

***a*)** De la tabla de conversión, tenemos que 1 ft = 0.305 m, así que

$$6.5\ \cancel{\text{ft}} \times \frac{0.305\ \text{m}}{1\ \cancel{\text{ft}}} = 2.0\ \text{m}$$

En la ◂Fig. 1.8 se muestra otra conversión pies-metros. ¿Es correcta?

***b*)** El factor de conversión para días y segundos está disponible en la tabla (1 día = 86 400 s), pero quizá no siempre tengamos una tabla a la mano. Podemos usar varios factores de conversión bien conocidos para obtener el resultado:

$$30\ \frac{\cancel{\text{días}}}{\text{mes}} \times \frac{24\ \cancel{\text{h}}}{\cancel{\text{día}}} \times \frac{60\ \cancel{\text{min}}}{\cancel{\text{h}}} \times \frac{60\ \text{s}}{\cancel{\text{min}}} = \frac{2.6 \times 10^6\ \text{s}}{\text{mes}}$$

Observe cómo el análisis de unidades se encarga de comprobar los factores de conversión. El resto es simple aritmética.

***c*)** En este caso, la tabla de conversión indica 1 mi = 1609 m y 1 h = 3600 s. (Esto último se puede calcular fácilmente.) Usamos estos cocientes para cancelar las unidades que se van a cambiar, y dejar así las unidades deseadas:

$$\frac{50\ \cancel{\text{mi}}}{1\ \cancel{\text{h}}} \times \frac{1609\ \text{m}}{1\ \cancel{\text{mi}}} \times \frac{1\ \cancel{\text{h}}}{3600\ \text{s}} = 22\ \text{m/s}$$

Ejercicio de refuerzo. *a*) Convierta 50 mi/h directamente a metros por segundo empleando un solo factor de conversión y *b*) demuestre que este factor de conversión único se puede deducir de los del inciso *c*). (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Ejemplo 1.4 ■ Más conversiones: un sistema de capilares en verdad largo

Los capilares, los vasos sanguíneos más pequeños del cuerpo, conectan el sistema arterial con el venoso y suministran oxígeno y nutrimentos a nuestros tejidos (▾figura 1.9). Se calcula que si todos los capilares de un adulto se enderezaran y conectaran extremo con extremo alcanzarían una longitud de unos 64 000 km. *a*) ¿Cuánto es esto en millas? *b*) Compare esta longitud con la circunferencia de la Tierra.

Razonamiento. *a*) Esta conversión es sencilla; basta con usar el factor de conversión apropiado. *b*) ¿Cómo calculamos la circunferencia de un círculo o esfera? Hay una ecua-

▶ **FIGURA 1.9 Sistema de capilares** Los capilares conectan los sistemas arterial y venoso del cuerpo. Son los vasos sanguíneos más pequeños, sin embargo, su longitud total es impresionante.

ción para hacerlo, pero necesitamos conocer el radio o el diámetro de la Tierra. (Si no recuerda uno de estos valores, vea la tabla de datos del sistema solar en los forros de este libro.)

Solución.

a) En la tabla de conversión vemos que 1 km = 0.621 mi, así que

$$64\,000\ \cancel{\text{km}} \times \frac{0.621\ \text{mi}}{1\ \cancel{\text{km}}} = 40\,000\ \text{mi} \quad \textit{(redondeo)}$$

b) Una longitud de 40 000 mi es considerable. Para compararla con la circunferencia (c) de la Tierra, recordemos que el radio de la Tierra mide aproximadamente 4000 mi, de manera que el diámetro (d) es 8000 mi. La circunferencia de un círculo está dada por $c = \pi d$, y

$$c = \pi d \approx 3 \times 8000\ \text{mi} \approx 24\,000\ \text{mi} \quad \textit{(sin redondeo)}$$

[Para que la comparación sea general, redondearemos π (= 3.14…) a 3. El símbolo $\approx$ significa "aproximadamente igual a".]

Entonces,

$$\frac{\text{longitud de capilares}}{\text{circunferencia de la Tierra}} = \frac{40\,000\ \text{mi}}{24\,000\ \text{mi}} = 1.7$$

Los capilares de nuestro cuerpo tienen una longitud total que daría 1.7 veces vuelta al mundo. ¡Caramba!

Ejercicio de refuerzo. Si tomamos la distancia promedio entre la costa este y la oeste de Estados Unidos como 4800 km, ¿cuántas veces cruzaría ese país la longitud total de los capilares de nuestro cuerpo? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Ejemplo 1.5 ■ Conversión de unidades de área: elegir el factor de conversión correcto

Un tablero de avisos tiene una área de 2.5 m^2. Exprese esta área en centímetros cuadrados (cm^2).

Razonamiento. Este problema es una conversión de unidades de área, y sabemos que 1 m = 100 cm. Por lo tanto, habría que elevar al cuadrado para obtener metros cuadrados y centímetros cuadrados.

Solución. Un error común en esta clase de conversiones es usar factores incorrectos. Dado que 1 m = 100 cm, algunos suponen que 1 m^2 = 100 cm^2, lo cual es falso. El factor de conversión de área correcto puede obtenerse directamente del factor de conversión lineal correcto, 100 cm/1 m, o 10^2 cm/1 m, elevándolo al cuadrado el factor de conversión lineal:

$$\left(\frac{10^2\ \text{cm}}{1\ \text{m}}\right)^2 = \frac{10^4\ \text{cm}^2}{1\ \text{m}^2}$$

Entonces, 1 m^2 = 10^4 cm^2 (= 10 000 cm^2), y podemos escribir lo siguiente:

$$2.5\ \text{m}^2 \times \left(\frac{10^2\ \text{cm}}{1\ \text{m}}\right)^2 = 2.5\ \cancel{\text{m}^2} \times \frac{10^4\ \text{cm}^2}{1\ \cancel{\text{m}^2}} = 2.5 \times 10^4\ \text{cm}^2$$

Ejercicio de refuerzo. ¿Cuántos centímetros cúbicos hay en un metro cúbico? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

A lo largo de este libro, presentaremos varios Ejemplos conceptuales. Éstos muestran el razonamiento seguido para aplicar conceptos específicos, a menudo con pocas matemáticas, o sin ellas.

Ejemplo conceptual 1.6 ■ Comparación de rapidez usando conversión de unidades

Dos estudiantes difieren en lo que consideran la rapidez más alta, *a*) 1 km/h o *b*) 1 m/s. ¿Cuál elegiría usted? *Plantee claramente el razonamiento que siguió para llegar a su respuesta, antes de leer el párrafo siguiente. Es decir,* ***¿por qué*** *escogió esa respuesta?*

Razonamiento y respuesta. Para contestar esto, hay que comparar las cantidades en las mismas unidades, lo cual implica conversión de unidades, tratando de encontrar las conversiones más sencillas. Al ver el prefijo *kilo-*, sabemos que 1 km es 1000 m. También, una hora se puede expresar como 3600 s. Entonces, la razón numérica de km/h es menor que 1, y 1 km/h $<$ 1 m/s, así que la respuesta es *b*). [1 km/h $=$ 1000 m/3600 s $=$ 0.3 m/s.]

Ejercicio de refuerzo. Un estadounidense y un europeo están comparando el rendimiento de la gasolina en sus respectivas camionetas. El estadounidense calcula que obtiene 10 mi/gal, y el europeo, 10 km/L. ¿Qué vehículo rinde más? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Algunos ejemplos de la importancia de la conversión de unidades se incluyen en la sección A fondo 1.3.

A FONDO 1.3 ¿ES IMPORTANTE LA CONVERSIÓN DE UNIDADES?

La respuesta a esta pregunta es “¡Ya lo creo!” Veamos un par de casos ilustrativos. En 1999, la sonda Mars Climate Orbiter hizo un viaje al Planeta Rojo para investigar su atmósfera (figura 1). La nave espacial se aproximó a Marte en septiembre, pero de pronto se perdió el contacto entre la sonda y el personal en la Tierra, y no se volvió a recibir señal de Mars. Las investigaciones demostraron que la sonda se había aproximado a Marte a una altitud mucho más baja de la planeada. En vez de pasar a 147 km (87 millas) por encima de la superficie marciana, los datos recabados indicaron que Mars seguía una trayectoria que la llevaría a tan sólo 57 km (35 millas) de la superficie. Como resultado, la nave espacial se quemó en la atmósfera de Marte o chocó contra la superficie.

¿Cómo pudo suceder esto? Las investigaciones indican que el fracaso del Orbiter se debió primordialmente a un problema con la conversión de unidades. En Lockheed Martin Astronautics, donde se construyó la nave espacial, los ingenieros calcularon la información de navegación en unidades inglesas. Cuando los científicos del Laboratorio de Propulsión de la NASA recibieron los datos, supusieron que la información estaba en unidades métricas, como se pedía en las especificaciones de la misión. No se hizo la conversión de unidades, y una nave espacial de 125 millones de dólares se perdió en el Planeta Rojo, lo que provocó la vergüenza de muchas personas.

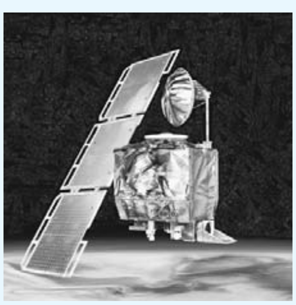


FIGURA 1 Mars Climate Orbiter La concepción de un artista de Mars cerca de la superficie del Planeta Rojo. La verdadera sonda se quemó en la atmósfera marciana, o chocó contra la superficie. La causa se atribuyó a la confusión de unidades, y el resultado fue que se perdió una nave espacial de 125 millones de dólares.

Más cerca de la Tierra, en 1983, el vuelo 143 de Air Canada seguía su trayecto de Montreal a Edmonton, Canadá, con 61 pasajeros a bordo del nuevo Boeing 767, el avión más avanzado del mundo para entonces. Casi a la mitad del vuelo, una luz de advertencia se encendió para una de las bombas de combustible, luego para otra, y finalmente para las cuatro bombas. Los motores se detuvieron y entonces este avanzado avión se volvió un planeador, cuando estaba a unas 100 millas del aeropuerto más cercano, en Winnipeg. Sin los motores funcionando, el avión del vuelo 143 se habría precipitado a 10 millas del aeropuerto, así que fue desviado a un viejo campo de aterrizaje de la Real Fuerza Aérea Canadiense, en Gimli. El piloto maniobró el avión sin potencia para el aterrizaje, deteniéndose a corta distancia de una barrera. ¿Acaso el avión apodado “el planeador de Gimli” tenía bombas de combustible en mal estado? No, ¡se quedó sin combustible!

Este reciente desastre fue provocado por otro problema de conversión. Las computadoras del combustible no funcionaban adecuadamente, así que los mecánicos utilizaron el antiguo procedimiento de medir el combustible en los tanques con una varilla de medición. La longitud de la varilla que se moja permite determinar el volumen de combustible por medio de valores en las tablas de conversión. Air Canada, durante años, había calculado la cantidad de combustible en libras; mientras que el consumo de combustible del 767 se expresaba en kilogramos. Y algo aún peor, el procedimiento de la varilla de medición daba la cantidad de combustible a bordo en litros, y no en libras o en kilogramos. El resultado fue que la aeronave se cargó con 22 300 lb de combustible en vez de los 22 300 kg que se requerían. Como 1 lb tiene una masa de 0.45 kg, el avión llevaba menos de la mitad del combustible necesario.

Estos incidentes destacan la importancia de emplear las unidades adecuadas, de efectuar correctamente las conversiones de unidades y de trabajar consistentemente con un mismo sistema de unidades. Varios ejercicios al final del capítulo lo desafiarán a desarrollar sus habilidades para realizar las conversiones de unidades de manera precisa.

1.6 Cifras significativas

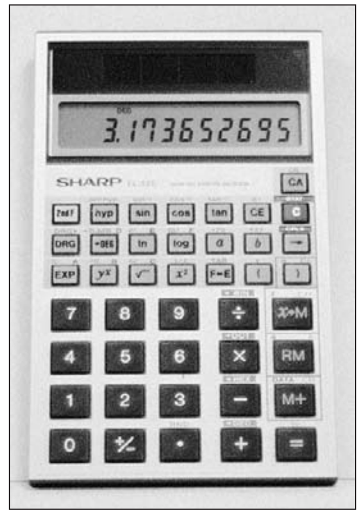
OBJETIVOS: *a*) Determinar el número de cifras significativas de un valor numérico, y *b*) informar el número correcto de cifras significativas después de realizar cálculos sencillos.

Cuando se nos pide resolver un problema, generalmente nos ofrecen datos numéricos. Por lo regular, tales datos son números exactos o números medidos (cantidades). Los **números exactos** son números sin incertidumbre ni error. Esta categoría incluye números como el "100" que se usa para calcular porcentajes, y el "2" de la ecuación $r = d/2$ que relaciona el radio con el diámetro de un círculo. Los **números medidos** son números que se obtienen a través de procesos de medición, por lo que casi siempre tienen cierto grado de incertidumbre o error.

Cuando efectuamos cálculos con números medidos, el error de medición se *propaga*, o se arrastra, en las operaciones matemáticas. Entonces, surge la duda de cómo informar el error en un resultado. Por ejemplo, supongamos que nos piden calcular el tiempo (t) con la fórmula $x = vt$ y se nos dice que $x = 5.3$ m y $v = 1.67$ m/s. Entonces,

$$t = \frac{x}{v} = \frac{5.3\ \text{m}}{1.67\ \text{m/s}} = ?$$

Si hacemos la división en calculadora, obtendremos un resultado como 3.173 652 695 segundos (▸figura 1.10). ¿Cuántas cifras, o dígitos, deberíamos informar en la respuesta?



▲ **FIGURA 1.10 Cifras significativas y no significativas** Para la operación de división 5.3/1.67, una calculadora con punto decimal flotante da muchos dígitos. Una cantidad calculada no puede ser más exacta que la cantidad menos exacta que interviene en el cálculo, de manera que este resultado debería redondearse a dos cifras significativas, es decir, 3.2.

El error de incertidumbre del resultado de una operación matemática podría calcularse usando métodos estadísticos. Un procedimiento más sencillo, y ampliamente utilizado, para estimar la incertidumbre implica el uso de **cifras significativas** (**cs**) o *dígitos significativos*. El grado de exactitud de una cantidad medida depende de qué tan finamente dividida esté la escala de medición del instrumento. Por ejemplo, podríamos medir la longitud de un objeto como 2.5 cm con un instrumento y 2.54 cm con otro; el segundo instrumento brinda más cifras significativas y un mayor grado de exactitud.

Básicamente, *las cifras significativas en cualquier medición son los dígitos que se conocen con certeza, más un dígito que es incierto.* Este conjunto de dígitos por lo regular se define como todos los dígitos que se pueden leer directamente del instrumento con que se hizo la medición, más un dígito incierto que se obtiene estimando la fracción de la división más pequeña de la escala del instrumento.

Las cantidades 2.5 cm y 2.54 cm tienen dos y tres cifras significativas, respectivamente, lo cual es bastante evidente. Sin embargo, podría haber cierta confusión si una cantidad contiene uno o más ceros. Por ejemplo, ¿cuántas cifras significativas tiene la cantidad 0.0254 m? ¿Y 104.6 m? ¿2705.0 m? En tales casos, nos guiamos por estas reglas:

1. Los ceros al principio de un número no son significativos. Simplemente ubican el punto decimal. Por ejemplo,

   0.0254 m tiene tres cifras significativas (2, 5, 4)

2. Los ceros dentro de un número son significativos. Por ejemplo,

   104.6 m tiene cuatro cifras significativas (1, 0, 4, 6)

3. Los ceros al final de un número, después del punto decimal, son significativos. Por ejemplo,

   2705.0 m tiene cinco cifras significativas (2, 7, 0, 5, 0)

4. En el caso de enteros sin punto decimal, que terminan con uno o más ceros (ceros a la derecha) —por ejemplo, 500 kg— los ceros podrían ser significativos o no. En tales casos, no queda claro cuáles ceros sirven sólo para ubicar el punto decimal y cuáles son realmente parte de la medición. Es decir, si el primer cero de la izquierda (5<u>0</u>0 kg) es el dígito estimado en la medición, sólo se conocerán con certeza dos dígitos, y sólo habrá dos cifras significativas. Asimismo, si el último

cero es el dígito estimado (50<u>0</u> kg), habrá tres cifras significativas. Esta ambigüedad podría eliminarse empleando notación científica (de potencias de 10):

$$5.0 \times 10^2 \text{ kg tiene dos cifras significativas}$$

$$5.00 \times 10^2 \text{ kg tiene tres cifras significativas}$$

Esta notación ayuda a expresar los resultados de los cálculos con el número correcto de cifras significativas, como veremos en breve. (El apéndice I incluye un repaso de la notación científica.)

(*Nota*: para evitar confusiones cuando demos cantidades con ceros a la derecha en los ejemplos y los ejercicios del texto, consideraremos que esos ceros son significativos. Por ejemplo, supondremos que un tiempo de 20 s tiene dos cifras significativas, aunque no lo escribamos como 2.0×10^1 s.)

Es importante informar los resultados de operaciones matemáticas con el número correcto de cifras significativas. Esto se logra siguiendo las reglas de 1) multiplicación y división y 2) suma y resta. Para obtener el número correcto de cifras significativas, los resultados se redondean. He aquí algunas reglas generales que usaremos para las operaciones matemáticas y el redondeo.

Cifras significativas en cálculos

1. Al multiplicar y dividir cantidades, deje tantas cifras significativas en la respuesta como haya en la cantidad con menos cifras significativas.
2. Al sumar o restar cantidades, deje el mismo número de posiciones decimales (redondeadas) en la respuestas como haya en la cantidad con menos decimales.

Reglas para redondear*

1. Si el primer dígito a desechar es menor que 5, deje el dígito anterior como está.
2. Si el primer dígito a desechar es 5 o más, incremente en 1 el dígito anterior.

Las reglas para cifras significativas implican que el resultado de un cálculo no puede ser más exacto que la cantidad menos exacta empleada. Es decir, no podemos aumentar la exactitud realizando operaciones matemáticas. Por lo tanto, el resultado que debería informarse para la operación de división que vimos al principio de esta sección es

$$\frac{\overset{(2\ cs)}{5.3\text{ m}}}{\underset{(3\ cs)}{1.67\text{ m/s}}} = 3.2\text{ s}\quad (2\ cs)$$

El resultado se redondea a dos cifras significativas. (Véase la figura 1.10.)

En los ejemplos que siguen se aplican estas reglas.

Ejemplo 1.7 ■ Uso de cifras significativas al multiplicar y dividir: aplicaciones de redondeo

Se realizan las operaciones siguientes y los resultados se redondean al número correcto de cifras significativas:

Multiplicación

$$\underset{(2\ cs)}{2.4\text{ m}} \times \underset{(3\ cs)}{3.65\text{ m}} = 8.76\text{ m}^2 = 8.8\text{ m}^2 \quad \textit{(redondeado a dos cs)}$$

División

$$\frac{\overset{(4\ cs)}{725.0\text{ m}}}{\underset{(3\ cs)}{0.125\text{ s}}} = 5800\text{ m/s} = 5.80 \times 10^3\text{ m/s} \quad \textit{(representado con tres cs; ¿por qué?)}$$

* Cabe señalar que estas reglas dan una exactitud aproximada, a diferencia de los resultados que se obtienen con métodos estadísticos más avanzados.

Ejercicio de refuerzo. Realice las siguientes operaciones y exprese las respuestas en la notación de potencias de 10 estándar (un dígito a la izquierda del punto decimal) con el número correcto de cifras significativas: *a*) $(2.0 \times 10^5\ \text{kg})(0.035 \times 10^2\ \text{kg})$ y *b*) $(148 \times 10^{-6}\ \text{m})/(0.4906 \times 10^{-6}\ \text{m})$. (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Ejemplo 1.8 ■ Uso de cifras significativas al sumar y restar: aplicación de las reglas

Se efectúan las siguientes operaciones encontrando el número que tiene menos decimales. (Por conveniencia se han omitido las unidades.)

Suma

En los números a sumar, observe que 23.1 es el que menos decimales tiene (uno):

$$\begin{array}{r} 23.1 \\ 0.546 \\ 1.45 \\ \hline 25.096 \end{array} \xrightarrow[\text{(redondeando)}]{} 25.1$$

Resta

Se usa el mismo procedimiento de redondeo. Aquí, 157 tiene el menor número de decimales (ninguno).

$$\begin{array}{r} 157 \\ -5.5 \\ \hline 151.5 \end{array} \xrightarrow[\text{(redondeando)}]{} 152$$

Ejercicio de refuerzo. Dados los números 23.15, 0.546 y 1.058, *a*) sume los primeros dos números y *b*) reste el último número al primero. (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Supongamos que debemos efectuar operaciones mixtas: multiplicación y/o división y suma y/o resta. ¿Qué hacemos en este caso? Simplemente seguimos las reglas de orden de las operaciones algebraicas, tomando nota de las cifras significativas sobre la marcha.

El número de dígitos que se informan en un resultado depende del número de dígitos de los datos. En general, en los ejemplos de este libro se obedecerán las reglas de redondeo, aunque habrá excepciones que darían pie a una diferencia, como se explica en la siguiente Sugerencia para resolver problemas.

Sugerencia para resolver problemas: la respuesta "correcta"

Al resolver problemas, el lector naturalmente tratará de obtener la respuesta correcta y quizá cotejará sus respuestas con las de la sección Respuestas a ejercicios impares al final del libro. Habrá ocasiones en que su respuesta difiera ligeramente de la que se da, aunque haya resuelto el problema de forma correcta. Esto podría deberse a varias cosas.

Como ya dijimos, lo mejor es redondear únicamente el resultado final de un cálculo de varias partes; sin embargo, esta práctica no siempre es conveniente en cálculos complejos. Hay casos en que los resultados de pasos intermedios son importantes en sí y deben redondearse al número adecuado de dígitos, como si fueran la respuesta final. Asimismo, los ejemplos de este libro a menudo se resuelven en pasos que muestran las etapas de *razonamiento* de la solución. Los resultados que se obtienen cuando se redondean los resultados de pasos intermedios tal vez difieran ligeramente, de aquellos que se obtienen cuando sólo se redondea la respuesta final.

También podría haber diferencias de redondeo cuando se usan factores de conversión. Por ejemplo, al convertir 5.0 mi a kilómetros, podríamos usar una de las dos formas del factor de conversión que se incluyen en los forros del libro:

$$5.0\ \cancel{\text{mi}}\left(\frac{1.609\ \text{km}}{1\ \cancel{\text{mi}}}\right) = (8.045\ \text{km}) = 8.0\ \text{km} \qquad \textit{(dos cifras significativas)}$$

y

$$5.0\ \cancel{\text{mi}}\left(\frac{1\ \text{km}}{0.621\ \cancel{\text{mi}}}\right) = (8.051\ \text{km}) = 8.1\ \text{km} \qquad \textit{(dos cifras significativas)}$$

(continúa en la siguiente página)

PHYSLET®

Exploración 1.1 Seleccionar y arrastrar a una posición

La diferencia se debe al redondeo de los factores de conversión. En realidad, 1 km = 0.6214 mi, así que 1 mi = (1/0.6214) km = 1.609 269 km ≈ 1.609 km. (Repita tales conversiones empleando los factores no redondeados, y vea qué obtiene.) Para evitar las diferencias de redondeo en las conversiones, por lo general utilizaremos la forma de multiplicación de los factores de conversión, como en la primera de las ecuaciones anteriores, a menos que haya un factor exacto conveniente, como 1 min/60 s.

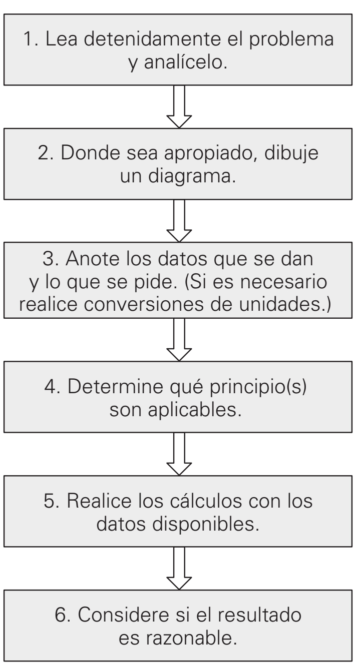
Quizá haya pequeñas diferencias en las respuestas cuando se emplean diferentes métodos para resolver un problema, debido a diferencias de redondeo. Tenga presente que, al resolver problemas (para lo cual se da un procedimiento general en la sección 1.7), *si su respuesta difiere de la del texto únicamente en el último dígito, lo más probable es que la disparidad sea una diferencia de redondeo al utilizar un método de resolución alternativo*.

1.7 Resolución de problemas

OBJETIVOS: *a*) Establecer un procedimiento general para resolver problemas y *b*) aplicarlo a problemas representativos.

Un aspecto destacado de la física es la resolución de problemas. En general, ello significa aplicar principios y ecuaciones de física a los datos de una situación específica, para encontrar el valor de una cantidad desconocida o deseada. No existe un método universal para enfrentar un problema que automáticamente produzca una solución. Aunque no hay una fórmula mágica para resolver problemas, si tenemos varias prácticas consistentes que son muy útiles. Los pasos del siguiente procedimiento buscan ofrecerle un marco general para aplicar a la resolución de la mayoría de los problemas que se plantean en el texto. (Tal vez desee realizar modificaciones para ajustarlo a su propio estilo.)

En general, seguiremos estos pasos al resolver los problemas de ejemplo a lo largo del texto. Se darán más sugerencias útiles para resolver problemas donde sea conveniente.



▲ **FIGURA 1.11 Diagrama de flujo del procedimiento sugerido para resolver problemas**

Procedimiento general para resolver problemas

1. *Lea detenidamente el problema y analícelo.* ¿Qué es lo que se pide y qué es lo que dan?
2. *Donde sea apropiado, dibuje un diagrama como ayuda para visualizar y analizar la situación física del problema.* Este paso quizá no sea necesario en todos los casos, pero a menudo resulta útil.
3. *Anote los datos que se dan y lo que se pide. Asegúrese que los datos estén expresados en el mismo sistema de unidades (por lo general el SI).* Si es necesario utilice el procedimiento de conversión de unidades que vimos en este capítulo. Quizás algunos datos no se den de forma explícita. Por ejemplo, si un automóvil "parte del reposo", su rapidez inicial es cero ($v_o = 0$). En algunos casos, se espera que el lector conozca ciertas cantidades, como la aceleración debida a la gravedad, g, o que las busque en tablas.
4. *Determine qué principio(s) y ecuación(es) son aplicables a la situación y cómo podrían llevarlo de la información dada a lo que se pide.* Tal vez sea necesario idear una estrategia de varios pasos. Asimismo, intente simplificar las ecuaciones lo más posible con manipulación algebraica. Cuanto menos cálculos realice, será menos probable que se equivoque: *no inserte los números antes de tiempo*.
5. *Sustituya las cantidades dadas (los datos) en la(s) ecuación(es) y efectúe los cálculos.* Informe el resultado en las unidades apropiadas y con el número correcto de cifras significativas.
6. *Considere si el resultado es razonable o no.* ¿La respuesta tiene una magnitud adecuada? (Es decir, ¿está en el orden correcto?) Por ejemplo, si la masa calculada para una persona resulta ser 4.60×10^2 kg, hay que dudar del resultado, pues 460 kg es un peso muy alto. ◂La figura 1.11 resume los principales pasos como un diagrama de flujo.

En general, hay tres tipos de ejemplos en este texto, como se indica en la tabla 1.4. Los pasos anteriores serían aplicables a los primeros dos tipos, puesto que incluyen cálculos. Los ejemplos conceptuales, en general, no siguen estos pasos, ya que son precisamente de naturaleza conceptual.

Al leer los ejemplos y los ejemplos integrados trabajados, usted deberá reconocer la aplicación general o el flujo de los pasos anteriores. Este formato se utilizará a lo largo del texto. Tomemos un ejemplo y otro integrado a manera de ilustración. En estos ejemplos se harán comentarios para destacar el enfoque de la resolución del problema y los pasos a seguir; esto no se hará en todos los ejemplos del libro, pero deberá comprenderse. Como en realidad no se han expuesto aún principios físicos, utilizaremos problemas de matemáticas y trigonometría, que servirán como un buen repaso.

TABLA 1.4 Tipos de ejemplos

Ejemplo: principalmente matemático por naturaleza Secciones: **Razonamiento Solución**
Ejemplo integrado: *a*) opción múltiple conceptual, *b*) refuerzo matemático Secciones: ***a*) Razonamiento conceptual** ***b*) Razonamiento cuantitativo y Solución**
Ejemplo conceptual: En general, sólo se necesita razonamiento para obtener la respuesta, aunque en ocasiones se requiere de matemáticas simples para justificar el razonamiento Secciones: **Razonamiento y Respuesta**

Ejemplo 1.9 ■ Encontrar el área de la superficie externa de un contenedor cilíndrico

Un contenedor cilíndrico cerrado, que se utiliza para almacenar material de un proceso de fabricación, tiene un radio exterior de 50.0 cm y una altura de 1.30 m. ¿Cuál es el área total de la superficie exterior del contenedor?

Razonamiento. (En este tipo de ejemplo, la sección Razonamiento generalmente combina los pasos 1 y 2 de la resolución de problemas que se explicaron antes.)

Debería notarse inmediatamente que las medidas de longitud se dan en unidades distintas, de manera que se requiere una conversión de unidades. Para visualizar y analizar el cilindro, resulta útil hacer un diagrama (▸figura 1.12). Con esta información en mente, se procede a encontrar la solución, utilizando la fórmula para el área de un cilindro (las áreas combinadas de los extremos circulares y la parte lateral del cilindro).

Solución. Se anota la información que se tiene y lo que se necesita encontrar (paso 3 del procedimiento):

Dados: $r = 50.0$ cm ***Encuentre:*** A (el área de la superficie exterior del cilindro)
$h = 1.30$ m

Primero, hay que ocuparse de las unidades. En este caso, usted debería ser capaz de escribir de inmediato $r = 50.0 \text{ cm} = 0.500$ m. Pero, con frecuencia, las conversiones no son obvias, así que detengámonos en la conversión de unidades para ilustrar:

$$r = 50.0 \text{ cm}\left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right) = 0.500 \text{ m}$$

Hay ecuaciones generales para obtener el área (y volumen) de objetos con formas comunes. El área de un cilindro se puede encontrar fácilmente (en el apéndice I); pero supongamos que usted no cuenta con esa fuente. En ese caso, le será posible determinarla. Al observar la figura 1.12, note que el área de la superficie exterior de un cilindro consiste en el área de dos extremos circulares y el área de un rectángulo (el cuerpo del cilindro extendido). Las ecuaciones para las áreas de estas formas comunes se recuerdan fácilmente. Entonces, el área de los dos extremos sería

$$2A_e = 2 \times \pi r^2 \quad \textit{(dos veces el extremo del área circular; área del círculo} = \pi r^2\textit{)}$$

y el área del cuerpo del cilindro es

$$A_b = 2\pi r \times h \quad \textit{(circunferencia del extremo circular multiplicada por la altura)}$$

Así, el área total es

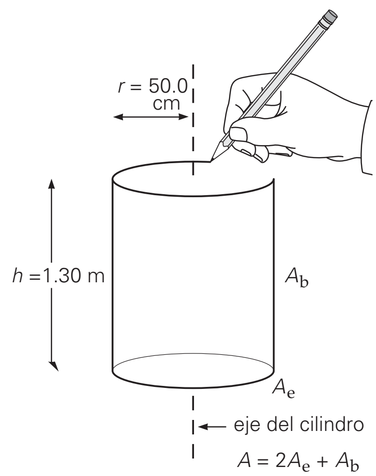
$$A = 2A_e + A_b = 2\pi r^2 + 2\pi rh$$

Los datos podrían colocarse en la ecuación; pero en ocasiones es conveniente simplificar esta última para ahorrarse algunos pasos en el cálculo.

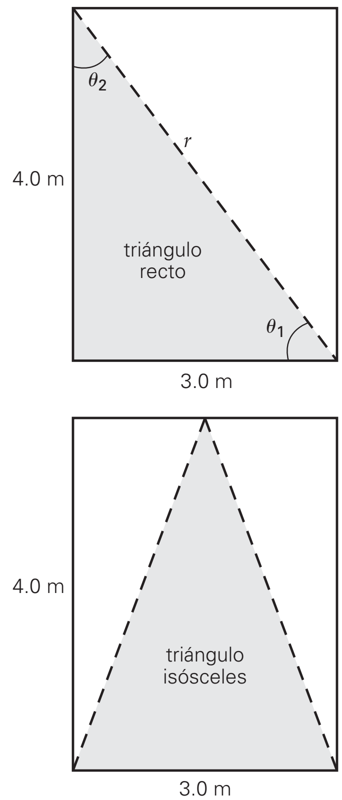
$$A = 2\pi r(r + h) = 2\pi(0.500 \text{ m})(0.500 \text{ m} + 1.30 \text{ m})$$
$$= \pi(1.80 \text{ m}^2) = 5.65 \text{ m}^2$$

y el resultado parece razonable considerando las dimensiones del cilindro.

Ejercicio de refuerzo. Si el grosor de las paredes de la parte lateral y de los extremos del cilindro es de 1.00 cm, ¿cuál es el volumen interior del cilindro? (*Las respuestas a los Ejercicios de refuerzo vienen al final del libro.*)



▲ **FIGURA 1.12 Un paso útil en la resolución del problema** Hacer un diagrama le ayudará a visualizar y a comprender mejor la situación. Véase el ejemplo 1.9.



▲ **FIGURA 1.13 Proyecto para un arriate de flores** Dos tipos de triángulos para un arriate de flores. Véase el ejemplo 1.10.

Ejemplo integrado 1.10 ■ Lados y ángulos

a) Una especialista en jardinería dispone de un terreno rectangular que mide 3.0×4.0 m. Desea utilizar la mitad de esta área para hacer un arriate de flores. De los dos tipos de triángulos que se ilustran en la ◂figura 1.13, ¿cuál debería utilizar para hacer esto? 1) El triángulo recto, 2) el triángulo isósceles (con dos lados iguales), o 3) cualquiera de los dos. *b*) Al diseñar el arriate, la jardinera decide utilizar el triángulo recto. Como quiere delimitar los lados con hileras de piedras, necesita conocer la longitud total (L) de los lados del triángulo. También le gustaría conocer los valores de los ángulos agudos del triángulo. ¿Podría ayudarla para que no tenga que tomar las medidas?

***a*) Razonamiento conceptual.** El terreno rectangular tiene una área total de $3.0 \times 4.0 \text{ m} = 12 \text{ m}^2$. Es evidente que el triángulo recto divide el terreno a la mitad (figura 1.13). Esto no es tan obvio en el caso del triángulo isósceles. Pero al prestar mayor atención, se observa que las zonas en blanco podrían arreglarse de tal manera que su área combinada resulte la misma que el área sombreada que forma el triángulo isósceles. Así que el triángulo isósceles también divide el terreno a la mitad y la respuesta correcta es 3. [Esto se comprueba matemáticamente calculando las áreas de los triángulos. Área $= \frac{1}{2}$(altura $\times$ base).]

***b*) Razonamiento cuantitativo y solución.** Para determinar la longitud total de los lados, necesitamos encontrar la longitud de la hipotenusa del triángulo. Esto se logra usando el teorema de Pitágoras, $x^2 + y^2 = r^2$, y

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(3.0 \text{ m})^2 + (4.0 \text{ m})^2} = \sqrt{25 \text{ m}^2} = 5.0 \text{ m}$$

(O de forma directa, tal vez usted haya notado que éste es un triángulo recto 3-4-5). Entonces,

$$L = 3.0 \text{ m} + 4.0 \text{ m} + 5.0 \text{ m} = 12 \text{ m}$$

Los ángulos agudos del triángulo se encuentran empleando trigonometría. En relación con los ángulos en la figura 1.13,

$$\tan \theta_1 = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}} = \frac{4.0 \text{ m}}{3.0 \text{ m}}$$

y

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{4.0 \text{ m}}{3.0 \text{ m}}\right) = 53°$$

De manera similar,

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{3.0 \text{ m}}{4.0 \text{ m}}\right) = 37°$$

que suman 90°, tal como se esperaría con un ángulo recto (90° + 90° = 180°).

Ejercicio de refuerzo. Determine la longitud total de los lados y los ángulos interiores del triángulo isósceles de la figura 1.13. (*Las respuestas a todos los Ejercicios de refuerzo vienen al final del libro.*)

Funciones trigonométricas básicas:

$$\cos \theta = \frac{x}{r}\left(\frac{\text{cateto adyacente}}{\text{hipotenusa}}\right)$$

$$\text{sen}\, \theta = \frac{y}{r}\left(\frac{\text{cateto opuesto}}{\text{hipotenusa}}\right)$$

$$\tan \theta = \frac{\text{sen}\, \theta}{\cos \theta} = \frac{y}{x}\left(\frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}}\right)$$

Estos ejemplos ilustran cómo se vinculan los pasos de la resolución de problemas para encontrar el resultado. Usted verá este patrón en los ejemplos resueltos en el libro, aunque no se haga explícito. Intente desarrollar sus propias habilidades para resolver problemas de una forma similar.

Por último, tomemos un ejemplo que supone razonamiento conceptual y algunos cálculos simples.

Ejemplo conceptual 1.11 ■ Ascenso en ángulo

Un piloto conduce su aeronave en dos tipos de ascenso en línea recta y con inclinación pronunciada a diferentes ángulos. En el primer ascenso, el avión recorre 40.0 km a un ángulo de 15 grados con respecto a la horizontal. En el segundo ascenso inclinado, el avión recorre 20.0 km a un ángulo de 30 grados con respecto a la horizontal. ¿Cómo se comparan las distancias verticales de los dos ascensos? *a*) La de la primera inclinación es mayor, *b*) la de la segunda inclinación es mayor, o *c*) ambas son iguales.

Razonamiento y respuesta. A primera vista, pareciera que las distancias verticales son iguales. Después de todo, el ángulo de la primera trayectoria es la mitad del de la segunda. Y la hipotenusa (distancia) del primer ascenso es el doble de la del segundo, así que ¿no se compensan los dos efectos de tal forma que la respuesta *c*) sea la correcta? No. La falla aquí radica en que la distancia vertical se basa en el seno del ángulo (haga un bosquejo), y el seno de un ángulo no es proporcional al ángulo. Verifique con su calculadora. $2 \times$ sen $15° = 0.518$ y sen $30° = 0.500$. De manera que no se compensan. La mitad de la distancia al doble del ángulo da por resultado una menor distancia vertical, así que la respuesta correcta es *a*).

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿el segundo ascenso tendría que ser más o menos pronunciado que 30 grados, para que las distancias de ascenso fueran iguales? ¿Cuál debería ser el ángulo en este caso?

Aproximación y cálculos de orden de magnitud

A veces, al resolver algunos problemas, quizá no nos interese obtener una respuesta exacta, sino tan sólo un estimado o una cifra "aproximada". Podemos hacer aproximaciones redondeando las cantidades para facilitar los cálculos y tal vez no valernos de la calculadora. Por ejemplo, suponga que desea tener una idea del área de un círculo cuyo radio $r = 9.5$ cm. Si redondeamos 9.5 cm $\approx$ 10 cm y $\pi \approx 3$ en vez de 3.14,

$$A = \pi r^2 \approx 3(10 \text{ cm})^2 = 300 \text{ cm}^2$$

(Es importante señalar que en los cálculos aproximados no nos fijamos en las cifras significativas.) La respuesta no es exacta, pero es una buena aproximación. Calcule la respuesta exacta para comprobarlo.

La notación de potencias de diez (científica) es muy conveniente para hacer aproximaciones en lo que se conoce como **cálculos de orden de magnitud**. *Orden de magnitud* significa que expresamos una cantidad a la potencia de 10 más cercana al valor real. Por ejemplo, en el cálculo anterior, aproximar 9.5 cm $\approx$ 10 cm equivale a expresar 9.5 como 10^1, y decimos que el radio *es del orden de* 10 cm. Expresar una distancia de 75 km $\approx 10^2$ km indica que la distancia es del orden de 10^2 km. El radio de la Tierra es 6.4×10^3 km $\approx 10^4$ km, es decir, del orden de 10^4 km. Una nanoestructura con 8.2×10^{-9} m de anchura es del orden de 10^{-8} m, o 10 nm. (¿Por qué el exponente -8?)

Desde luego, un cálculo de orden de magnitud sólo da un estimado, pero éste bastaría para captar o entender mejor una situación física. Por lo general, el resultado de un cálculo de orden de magnitud tiene una precisión dentro de una potencia de 10, es decir, *dentro de un orden de magnitud*. De manera que el número que multiplica a la potencia de 10 está entre 1 y 10. Por ejemplo, si nos dieran un resultado de tiempo de 10^5 s, esperaríamos que la respuesta exacta esté entre 1×10^5 s y 10×10^5 s.

Ejemplo 1.12 ■ Cálculo de orden de magnitud: extracción de sangre

Un técnico médico extrae 15 cc de sangre de la vena de un paciente. En el laboratorio, se determina que este volumen de sangre tiene una masa de 16 g. Estime la densidad de la sangre, en unidades estándar del SI.

Razonamiento. Los datos se dan en unidades cgs (centímetro-gramo-segundo), que resultan prácticas para manejar cantidades enteras pequeñas en algunas situaciones. En medicina y química es común usar la abreviatura cc para indicar cm^3. La densidad (ρ) es masa por unidad de volumen, donde $\rho = m/V$ (sección 1.4).

Solución.

Dado: $m = 16\,\cancel{\text{g}}\left(\dfrac{1 \text{ kg}}{1000\,\cancel{\text{g}}}\right) = 1.6 \times 10^{-2} \text{ kg} \approx 10^{-2} \text{ kg}$ ***Encuentre:*** el estimado de ρ (densidad)

$$V = 15\,\cancel{\text{cm}^3}\left(\frac{1 \text{ m}}{10^2\,\cancel{\text{cm}}}\right)^3 = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \approx 10^{-5} \text{ m}^3$$

Por lo tanto, tenemos

$$\rho = \frac{m}{V} \approx \frac{10^{-2} \text{ kg}}{10^{-5} \text{ m}^3} \approx 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Este resultado es muy cercano a la densidad promedio de la sangre entera, 1.05×10^3 kg/m^3.

Ejercicio de refuerzo. Un paciente recibe 750 cc de sangre entera. Estime la masa de la sangre, en unidades estándar. (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Ejemplo 1.13 ■ ¿Cuántos glóbulos rojos hay en la sangre?

El volumen de sangre del cuerpo humano varía según la edad, el tamaño y el sexo del individuo. En promedio, el volumen es de unos 5 L. Un valor representativo para la concentración de glóbulos rojos (eritrocitos) es 5 000 000 por mm^3. Estime el número de glóbulos rojos que hay en su cuerpo.

Razonamiento. La cuenta de glóbulos rojos en células/mm^3 es una especie de "densidad" de glóbulos rojos. Si la multiplicamos por el volumen total de sangre [(células/volumen) $\times$ volumen total], obtendremos el número total de células. Sin embargo, tome en cuenta que los volúmenes deben estar en las mismas unidades.

Solución.

Dado:

$$V = 5\text{ L}$$
$$= 5\,\cancel{\text{L}}\left(10^{-3}\,\frac{\text{m}^3}{\cancel{\text{L}}}\right)$$
$$= 5 \times 10^{-3}\text{ m}^3 \approx 10^{-2}\text{ m}^3$$

Encuentre: el número aproximado de glóbulos rojos en el cuerpo

$$\text{células/volumen} = 5 \times 10^6\,\frac{\text{células}}{\text{mm}^3} \approx 10^7\,\frac{\text{células}}{\text{mm}^3}$$

Luego, cambiando a m^3,

$$\frac{\text{células}}{\text{volumen}} \approx 10^7\,\frac{\text{células}}{\cancel{\text{mm}^3}}\left(\frac{10^3\,\cancel{\text{mm}}}{1\text{ m}}\right)^3 \approx 10^{16}\,\frac{\text{células}}{\text{m}^3}$$

(*Nota*: el factor de conversión de L a m^3 se obtuvo directamente de las tablas de conversión, pero no se da un factor para convertir mm^3 a m^3, así que tan sólo empleamos una conversión conocida y la elevamos al cubo.) Por lo tanto, tenemos,

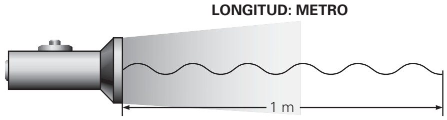
$$\left(\frac{\text{células}}{\text{volume}}\right)(\text{volumen total}) \approx \left(10^{16}\,\frac{\text{células}}{\cancel{\text{m}^3}}\right)(10^{-2}\,\cancel{\text{m}^3}) = 10^{14}\text{ glóbulos rojos}$$

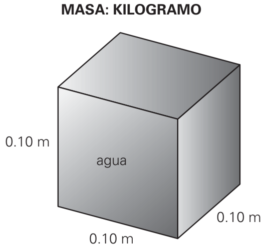
Los glóbulos rojos (eritrocitos) son una de las células más abundantes presentes en el cuerpo humano.

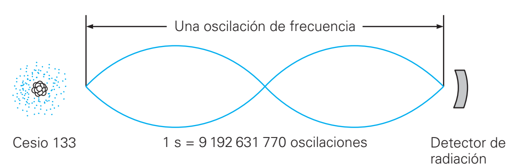
Ejercicio de refuerzo. El número promedio de glóbulos blancos (leucocitos) en la sangre humana es de 5000 a 10 000 células por mm^3. Estime cuántos glóbulos blancos tiene en su cuerpo. (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Repaso del capítulo

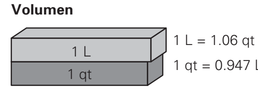
- **Unidades SI de longitud, masa y tiempo.** El metro (m), el kilogramo (kg) y el segundo (s), respectivamente.







- **Litro (L).** Un volumen de 1000 mL o 1000 cm^3. Un litro de agua tiene una masa muy cercana a 1 kg.



- **Análisis de unidades.** Sirve para determinar la consistencia de una ecuación, es decir, si es dimensionalmente correcta. El análisis de unidades ayuda a averiguar la unidad de una cantidad.
- **Cifras (dígitos) significativas.** Los dígitos que se conocen con certeza, más uno que es incierto, en los valores medidos.
- **Resolución de problemas.** Los problemas deben enfrentarse con un procedimiento consistente. Pueden realizarse cálculos de orden de magnitud si sólo se desea un valor aproximado.

Procedimiento sugerido para resolver problemas:

1. Lea detenidamente el problema y analícelo.
2. Donde sea apropiado, dibuje un diagrama.
3. Anote los datos que se dan y lo que se pide. (Si es necesario realice conversiones de unidades.)
4. Determine qué principio(s) son aplicables.
5. Realice los cálculos con los datos disponibles.
6. Considere si el resultado es razonable.

- **Densidad (ρ).** La masa por unidad de volumen de un objeto o sustancia, la cual es una medida de qué tan compacto es el material que contiene:

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{\text{masa}}{\text{volumen}}\right) \tag{1.1}$$

Ejercicios*

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales, y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

1.2 Unidades SI de longitud, masa y tiempo

1. **OM** ¿Cuántas unidades base tiene el SI: *a*) 3, *b*) 5, *c*) 7 o *d*) 9?

2. **OM** El único estándar del SI representado por un artefacto es *a*) el metro, *b*) el kilogramo, *c*) el segundo o *d*) la carga eléctrica.

3. **OM** ¿Cuál de las siguientes no es una cantidad base del SI? *a*) masa, *b*) peso, *c*) longitud o *d*) tiempo?

4. **OM** ¿Cuál de las siguientes es la unidad base de masa en el SI? *a*) libra, *b*) gramo, *c*) kilogramo o *d*) tonelada?

5. **PC** ¿Por qué no hay más unidades base en el SI?

6. **PC** ¿Por qué el peso no es una cantidad base?

7. **PC** ¿Con qué se reemplazó la definición original de segundo y por qué? ¿El reemplazo se continúa usando?

8. **PC** Mencione dos diferencias importantes entre el SI y el sistema inglés.

* Tenga presente aquí y en todo el libro que su respuesta a un ejercicio impar quizá difiera ligeramente de la dada al final del libro, a causa del redondeo. Vea la Sugerencia para resolver problemas: La "respuesta correcta" en este capítulo.

1.3 Más acerca del sistema métrico

9. **OM** El prefijo *giga-* significa *a*) 10^{-9}, *b*) 10^9, *c*) 10^{-6}, *d*) 10^6.

10. **OM** El prefijo *micro-* significa *a*) 10^6, *b*) 10^{-6}, *c*) 10^3 o *d*) 10^{-3}.

11. **OM** Una nueva tecnología tiene que ver con el tamaño de objetos de qué prefijo métrico: *a*) *nano-*, *b*) *micro-*, *c*) *mega-*, *d*) *giga-*.

12. **OM** Un litro de agua tiene un volumen de *a*) 1 m^3, *b*) 1 qt, *c*) 1000 cm^3, *d*) 10^4 mm^3.

13. **PC** Si un compañero le dice que vio una mariquita de 3 cm de largo en su jardín, ¿le creería? ¿Y si otro estudiante afirma haber pescado un salmón de 10 kg?

14. **PC** Explique por qué 1 mL es equivalente a 1 cm^3.

15. **PC** Explique por qué una tonelada métrica es equivalente a 1000 kg.

16. ● El sistema métrico es un sistema decimal (base 10) y el sistema inglés es, en parte, un sistema duodecimal (base 12). Comente las consecuencias que tendría el uso de un sistema monetario duodecimal. ¿Qué valores tendrían las monedas en tal caso?

17. ● *a*) En el sistema inglés, 16 oz = 1 pt y 16 oz = 1 lb. ¿Hay un error aquí? Explique. *b*) Un acertijo viejo: ¿Una libra de plumas pesa más que una libra de oro? ¿Cómo es posible? (*Sugerencia:* Busque *ounce* en un diccionario en inglés.)

18. ●● Un marino le dice que si su barco viaja a 25 nudos (millas náuticas por hora) se está moviendo con mayor rapidez que un auto que viaja a 25 millas por hora. ¿Cómo es posible?

1.4 Análisis de unidades*

19. **OM** Ambos lados de una ecuación son iguales en *a*) valor numérico, *b*) unidades, *c*) dimensiones o *d*) todo lo anterior.

20. **OM** El análisis de unidades de una ecuación no puede decirnos si *a*) la ecuación es dimensionalmente correcta, *b*) la ecuación es físicamente correcta, *c*) el valor numérico es correcto o *d*) tanto *b* como *c*.

21. **OM** ¿Cuál de los siguientes incisos es verdadero para la cantidad $\frac{x}{t}$: *a*) Podría tener las mismas dimensiones pero unidades diferentes; *b*) podría tener las mismas unidades pero dimensiones diferentes; o *c*) tanto *a* como *b* son verdaderas.

22. **PC** ¿El análisis de unidades puede decirnos si usamos la ecuación correcta para resolver un problema? Explique.

23. **PC** La ecuación para encontrar el área de un círculo a partir de dos fuentes está dada como $A = \pi r^2$ y $A = \pi d^2/2$. ¿El análisis de unidades puede decirnos cuál es la correcta? Explique.

24. **PC** ¿Cómo podría el análisis de unidades ayudar a determinar las unidades de una cantidad?

25. ● Demuestre que la ecuación $x = x_o + vt$ es dimensionalmente correcta, donde v es velocidad, x y x_o son longitudes, y t es el tiempo.

26. ● Si x se refiere a distancia, v_o y v a rapideces, a a aceleración y t a tiempo, ¿cuál de las siguientes ecuaciones es dimensionalmente correcta? *a*) $x = v_o t + at^3$, *b*) $v^2 = v_o^2 + 2at$; *c*) $x = at + vt^2$; o *d*) $v^2 = v_o^2 + 2ax$.

27. ●● Use el análisis de unidades SI para demostrar que la ecuación $A = 4\pi r^2$, donde A es el área y r es el radio de una esfera, es dimensionalmente correcta.

28. ●● Le dicen a usted que el volumen de una esfera está dado por $V = \pi d^3/4$, donde V es el volumen y d es el diámetro de la esfera. ¿Esta ecuación es dimensionalmente correcta? (Use análisis de unidades SI para averiguarlo.)

29. ●● La ecuación correcta para el volumen de una esfera es $V = 4\pi r^3/3$, donde r es el radio de la esfera. ¿Es correcta la ecuación del ejercicio 28? Si no, ¿cómo debería expresarse en términos de d?

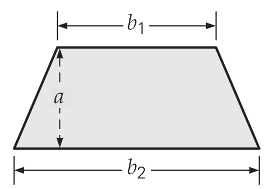
30. ●● La energía cinética (K) de un objeto de masa m que se mueve con velocidad v está dada por $K = \frac{1}{2}mv^2$. En el SI el nombre para la unidad de energía cinética es el joule (J). ¿Cuáles son las unidades del joule en términos de las unidades base del SI?

31. ●● La ecuación general de una parábola es $y = ax^2 = bx + c$, donde a, b y c son constantes. ¿Qué unidades tiene cada constante si y y x están en metros?

32. ●● En términos de las unidades base del SI se sabe que las unidades para presión (p) son $\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$. Como tarea para su clase de física un estudiante deriva una expresión para la presión que ejerce el viento sobre una pared en términos de la densidad del aire (ρ) y de la velocidad del viento (v), y su resultado es $p = \rho v^2$. Utilice el análisis de unidades SI para demostrar que el resultado del estudiante es dimensionalmente consistente. ¿Esto prueba que su relación es físicamente correcta?

33. ●● La densidad se define como la masa de un objeto dividida entre el volumen del objeto. Use análisis de unidades SI para determinar la unidad SI de densidad. (Véase la sección 1.4 para las unidades de masa y volumen.)

34. ●● ¿Es dimensionalmente correcta la ecuación del área de un trapezoide, $A = \frac{1}{2}a(b_1 + b_2)$, donde a es la altura, y b_1 y b_2 son las bases? (▼figura 1.14.)



▲ **FIGURA 1.14 Área de un trapezoide** Véase el ejercicio 34.

35. ●● Utilizando análisis de unidades, un estudiante dice que la ecuación $v = \sqrt{2ax}$ es dimensionalmente correcta. Otro lo niega. ¿Quién cree usted que tenga la razón y por qué?

36. ●●● La segunda ley del movimiento de Newton (capítulo 4) se expresa con la ecuación $F = ma$, donde F representa fuerza, m es masa y a es aceleración. *a*) La unidad SI de fuerza lleva el muy adecuado nombre de newton (N). ¿A qué unidades equivale el newton en términos de cantidades base? *b*) Una ecuación para la fuerza, relacionada con el movimiento circular uniforme (capítulo 7) es $F = mv^2/r$, donde v es velocidad y r es el radio de la trayectoria circular. ¿Esta ecuación da las mismas unidades para el newton?

37. ●●● El momento angular (L) de una partícula de masa m que se mueve a una velocidad constante v en un círculo de radio r está dada por $L = mvr$. *a*) ¿Cuáles son las unidades del momento angular en términos de las unidades base del SI? *b*) Las unidades de energía cinética en términos de las unidades base del SI son $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$. Utilizando

* Las unidades de velocidad y aceleración se dan en la tabla 1.3.

el análisis de unidades SI, demuestre que la expresión para la energía cinética de esta partícula, en términos de su momento angular, $K = \frac{L^2}{2mr^2}$, es dimensionalmente correcta. *c*) En la ecuación anterior, el término mr^2 se denomina *momento de inercia* de la partícula en el círculo. ¿Cuáles son las unidades del momento de inercia en términos de las unidades base del SI?

38. ●●● La famosa equivalencia masa-energía de Einstein se expresa con la ecuación $E = mc^2$, donde E es energía, m es masa y c es la velocidad de la luz. *a*) ¿Qué unidades base tiene la energía en el SI? *b*) Otra ecuación para la energía es $E = mgh$, donde m es masa, g es la aceleración debida a la gravedad y h es altura. ¿Esta ecuación da las mismas unidades que en el inciso *a*)?

1.5 Conversión de unidades*

39. **OM** Una buena forma de garantizar la conversión correcta de unidades es *a*) usar otro instrumento de medición, *b*) siempre trabajar con el mismo sistema de unidades, *c*) usar análisis de unidades o *d*) decirle a alguien que verifique los cálculos.

40. **OM** Es común ver la igualdad 1 kg = 2.2 lb, lo cual significa que *a*) 1 kg equivale a 2.2 lb, *b*) es una ecuación verdadera, *c*) 1 lb = 2.2 kg o *d*) nada de lo anterior.

41. **OM** Usted tiene una cantidad de agua y quiere expresarla en unidades de volumen que den el número más grande. ¿Debería utilizar *a*) pulg^3; *b*) mL; *c*) μL; o *d*) cm^3?

42. **PC** ¿Los enunciados de una ecuación y de una equivalencia son lo mismo? Explique.

43. **PC** ¿Hace alguna diferencia multiplicar por un factor de conversión o dividir entre éste? Explique.

44. **PC** El análisis de unidades se aplica a la conversión de unidades? Explique.

45. ● La figura 1.8 (arriba) muestra la altura de un lugar tanto en pies como en metros. Si un poblado está 130 ft arriba del nivel del mar, a qué altitud estará en metros?

46. **EI** ● *a*) Si queremos expresar una estatura con el número más grande, usaremos 1) metros, 2) pies, 3) pulgadas o 4) centímetros? ¿Por qué? *b*) Si una persona mide 6.00 ft de estatura, ¿cuánto mide en centímetros?

47. ● Si los capilares de un adulto promedio se enderezaran y extendieran extremo con extremo, cubrirían una longitud de más de 40 000 mi (figura 1.9). Si su estatura es de 1.75 m, ¿a cuántas veces su estatura equivaldría la longitud de los capilares?

* Los factores de conversión se dan en los forros de este libro.

48. **EI** ● *a*) ¿En comparación con una botella de bebida gaseosa de dos litros, una de medio galón contiene 1) más, 2) la misma cantidad, o 3) menos bebida? *b*) Verifique su respuesta en el inciso *a*.

49. ● *a*) Un campo de fútbol americano mide 300 ft de largo y 160 ft de ancho. Dé sus dimensiones en metros. *b*) Un balón mide entre 11.0 y 11.25 pulg de largo. ¿Qué longitud tiene en centímetros?

50. ● Suponga que cuando Estados Unidos se vuelva totalmente métrico, las dimensiones de los campos de fútbol americano se fijarán en 100 m por 54 m. ¿Qué sería más grande, el campo métrico o un campo actual (véase el ejercicio 49a), y qué diferencia habría entre sus áreas?

51. ●● Si la sangre fluye con una rapidez promedio de 0.35 m/s en el sistema circulatorio humano, ¿cuántas millas viaja un glóbulo en 1.0 h?

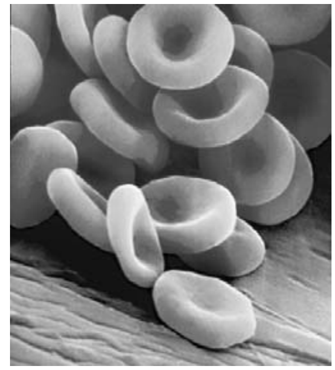
52. ●● A bordo de un automóvil a reacción, el piloto de la Real Fuerza Aérea Andy Green rompió por primera vez la barrera del sonido sobre la tierra y alcanzó una rapidez terrestre récord de más de más de 763 mi/h en el desierto Black Rock (Nevada) el 15 de octubre de 1997 (▼figura 1.15). *a*) Exprese esta velocidad en m/s. *b*) ¿Cuánto tardaría el automóvil a reacción en recorrer un campo de fútbol de 300 ft a esa velocidad?

▲ **FIGURA 1.15 Recorrido récord** Véase el ejercicio 52.

53. **EI** ●● *a*) ¿Qué representa la mayor velocidad: 1) 1 m/s, 2) 1 km/h, 3) 1 ft/s, o 4) 1 mi/h? *b*) Exprese la velocidad de 15.0 m/s en mi/h.

54. ●● En la ▼figura 1.16 se muestra el velocímetro de un automóvil, *a*) ¿Qué lecturas equivalentes en kilómetros por hora irían en cada cuadro vacío? *b*) ¿Cuál sería la velocidad límite de 70 mi/h en kilómetros por hora?

▲ **FIGURA 1.16 Lecturas del velocímetro** Véase el ejercicio 54.



▲ **FIGURA 1.18 Glóbulos rojos** Véase el ejercicio 60.

55. ●● Un individuo pesa 170 lb. *a*) ¿Cuál es su masa en kilogramos? *b*) Suponiendo que la densidad promedio del cuerpo humano es más o menos la misma del agua (lo cual es cierto), estime el volumen del cuerpo de este individuo tanto en metros cúbicos como en litros. Explique porque la unidad más pequeña del litro es más adecuada (conveniente) para describir este volumen.

56. ●● Si los componentes del sistema circulatorio humano (arterias, venas y capilares) estuvieran completamente estirados y unidos extremo con extremo, su longitud sería del orden de 100 000 km. ¿La longitud del sistema circulatorio alcanzaría para rodear la circunferencia de la Luna? Si es así, ¿cuántas veces?

57. ●● Los latidos del corazón humano, según su frecuencia del pulso, normalmente son de aproximadamente 60 latidos/min. Si el corazón bombea 75 mL de sangre en cada latido, ¿cuál es el volumen de sangre que se bombea en un día (en litros)?

58. ●● En el fútbol americano un receptor abierto común puede correr las 40 yardas en aproximadamente 4.5 segundos, partiendo del reposo. *a*) ¿Cuál es su velocidad promedio en m/s? *b*) ¿Cuál es su velocidad promedio en mi/h?

59. ●● En la ▼figura 1.17 se muestran las etiquetas de dos productos comunes. Úselas para determinar *a*) cuántos mililitros hay en 2 onzas líquidas (fl. oz.) y *b*) cuántas onzas hay en 100 g.

▲ **FIGURA 1.17 Factores de conversión** Véase el ejercicio 59.

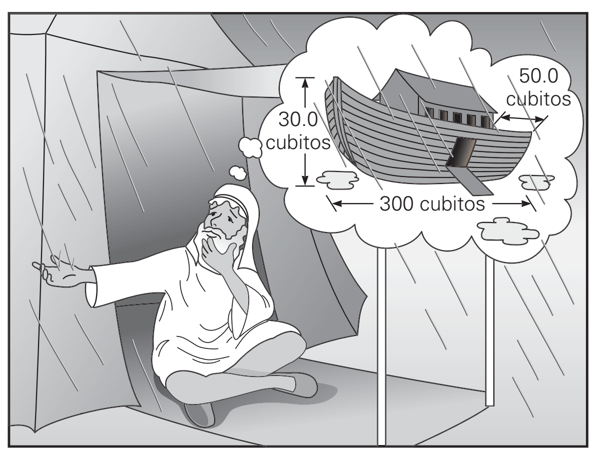
60. ●● La ▲figura 1.18 muestra glóbulos rojos vistos con un microscopio electrónico de barrido. Normalmente, las mujeres tienen unos 4.5 millones de estas células en cada milímetro cúbico de sangre. Si la sangre fluye por el corazón a razón de 250 mL/min, ¿cuántos glóbulos rojos pasarán por el corazón de una mujer cada segundo?

61. ●●● Una estudiante midió 18 pulg de largo al nacer. Ahora, a los 20 años, tiene una estatura de 5 ft 6 pulg. ¿Cuántos centímetros ha crecido en promedio al año?

62. ●●● La densidad del mercurio metálico es de 13.6 g/cm^3. *a*) Exprese esta densidad en kg/m^3. *b*) ¿Cuántos kilogramos de mercurio se necesitarían para llenar un recipiente de 0.250 L?

63. ●●● El Coliseo Romano solía inundarse con agua para recrear antiguas batallas navales. Suponiendo que el piso del Coliseo es de 250 m de diámetro y el agua tiene una profundidad de 10 pies, *a*) ¿cuántos metros cúbicos de agua se necesitaron? *b*) ¿Cuánta masa tendría esta agua en kilogramos? *c*) ¿Cuánto pesaría el agua en libras?

64. ●●● En la Biblia, Noé debe construir un arca de 300 cubitos de largo, 50.0 cubitos de ancho y 30.0 cubitos de altura (▼figura 1.19). Los registros históricos indican que un cubito mide media yarda. *a*) ¿Qué dimensiones tendría el arca en metros? *b*) ¿Qué volumen tendría el arca en metros cúbicos? Para aproximar, suponga que el arca será rectangular.



▲ **FIGURA 1.19 Noé y su arca** Véase el ejercicio 64.

1.6 Cifras significativas

65. **OM** ¿Qué tiene más cifras significativas: *a*) 103.07, *b*) 124.5, *c*) 0.09916 o *d*) 5.408×10^5?

66. **OM** ¿Cuál de los siguientes números tiene cuatro cifras significativas? *a*) 140.05, *b*) 276.02, *c*) 0.004 006 o *d*) 0.073 004?

67. **OM** En una operación de multiplicación y/o división con los números 15 437, 201.08 y 408.0×10^5, ¿a cuántas cifras significativas debe redondearse el resultado? *a*) 3, *b*) 4, *c*) 5 o *d*) cualquier cantidad.

68. **PC** ¿Cuál es el propósito de las cifras significativas?

69. **PC** ¿Se conocen exactamente todas las cifras significativas informadas por un valor medido?

70. **PC** ¿Cómo se determina el número de cifras significativas para los resultados de cálculos que impliquen *a*) multiplicación, *b*) división, *c*) suma, *d*) resta?

71. ● Exprese la longitud 50 500 μm (micrómetros) en centímetros, decímetros y metros, con tres cifras significativas.

72. ● Utilizando un metro, un estudiante mide una longitud y la informa como 0.8755 m. ¿Cuánto mide la división más pequeña de la escala del metro?

73. ● Determine el número de cifras significativas en los siguientes números medidos: *a*) 1.007 m; *b*) 8.03 cm; *c*) 16.272 kg; *d*) 0.015 μs (microsegundos).

74. ● Exprese cada uno de los números del ejercicio 73 con dos cifras significativas.

75. ● ¿Cuál de las siguientes cantidades tiene tres cifras significativas: *a*) 305.0 cm, *b*) 0.0500 mm, *c*) 1.000 81 kg o *d*) 8.06×10^4 m^2?

76. ●● La portada de su libro de física mide 0.274 m de largo y 0.222 m de ancho. Calcule su área en m^2.

77. ●● El congelador (nevera) del refrigerador de un restaurante mide 1.3 m de altura, 1.05 m de ancho y 67 cm de profundidad. Determine su volumen en pies cúbicos.

78. **EI** ●● La superficie de una mesa rectangular mide 1.245 m por 0.760 m. *a*) La división más pequeña en la escala del instrumento de medición es 1) m, 2) cm, 3) mm. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es el área de la superficie de la mesa?

79. **EI** ●● Las dimensiones exteriores de una lata cilíndrica de gaseosa se informan como 12.559 cm para el diámetro y 5.62 cm para la altura. *a*) ¿Cuántas cifras significativas tendrá el área exterior total? 1) dos, 2) tres, 3) cuatro o 4) cinco. ¿Por qué? *b*) Calcule el área total exterior de la lata en cm^3.

80. ●● Exprese los siguientes cálculos con el número adecuado de cifras significativas: *a*) $12.634 + 2.1$; *b*) $13.5 - 2.143$; *c*) $\pi(0.25\text{ m})^2$; *d*) $2.37/3.5$.

81. **EI** ●●● Al resolver un problema, un estudiante suma 46.9 m y 5.72 m, y luego resta 38 m al resultado. *a*) ¿Cuántas posiciones decimales tendrá la respuesta final? 1) cero, 2) una o 3) dos. ¿Por qué? *b*) Dé la respuesta final.

82. ●●● Resuelva este ejercicio por los dos procedimientos que se indican, y comente y explique cualquier diferencia en las respuestas. Efectúe los cálculos usando una calculadora. Calcule $p = mv$, donde $v = x/t$. Se da: $x = 8.5$ m, $t = 2.7$ s y $m = 0.66$ kg. *a*) Primero calcule v y luego p. *b*) Calcule $p = mx/t$ sin paso intermedio. *c*) ¿Son iguales los resultados? Si no, ¿por qué?

1.7 Resolución de problemas

83. **OM** Un paso importante para resolver problemas antes de resolver matemáticamente una ecuación es *a*) verificar unidades, *b*) verificar cifras significativas, *c*) consultarlo con un amigo o *d*) comprobar que el resultado sea razonable.

84. **OM** Un último paso importante al resolver problemas, antes de informar la respuesta es *a*) guardar los cálculos, *b*) leer otra vez el problema, *c*) ver si la respuesta es razonable o *d*) cotejar los resultados con otro estudiante.

85. **OM** En lo cálculos de orden de magnitud, usted debería *a*) poner mucha atención en las cifras significativas, *b*) trabajar principalmente con el sistema inglés, *c*) obtener los resultados dentro de un factor de 100, *d*) expresar una cantidad a la potencia de 10 más cercana al valor real.

86. **PC** ¿Cuántos pasos implica un buen procedimiento para resolver problemas como el que se sugiere en este capítulo?

87. **PC** ¿Cuáles son los pasos fundamentales en el procedimiento para resolver problemas?

88. **PC** Cuando usted hace cálculos de orden de magnitud, ¿debería estar conciente de las cifras significativas? Explique.

89. **PC** Cuando usted hace cálculos de orden de magnitud, ¿qué tan precisa esperaría que fuera la respuesta? Explique.

90. ● Un lote de construcción en una esquina tiene forma de triángulo rectángulo. Si los dos lados perpendiculares entre sí miden 37 m y 42.3 m, respectivamente, ¿cuánto mide la hipotenusa?

91. ● El material sólido más ligero es el aerogel de sílice, cuya densidad típica es de aproximadamente 0.10 g/cm^3. La estructura molecular del aerogel de sílice suele tener 95% de espacio vacío. ¿Qué masa tiene 1 m^3 de aerogel de sílice?

92. ●● Casi todos los alimentos envasados muestran información nutrimental en la etiqueta. En la ▼figura 1.20 se muestra una etiqueta abreviada, relativa a la grasa. Cuando un gramo de grasa se quema en el cuerpo, proporciona 9 calorías. (Una caloría alimentaria es en realidad una kilocaloría, como veremos en el capítulo 11.) *a*) ¿Qué porcentaje de las calorías de una porción proviene de grasas? *b*) Note que nuestra respuesta no coincide con el porcentaje de grasa total que se da en la figura 1.20. Ello se debe a que los valores porcentuales diarios dados son porcentajes de las cantidades máximas recomendadas de nutrimentos (en

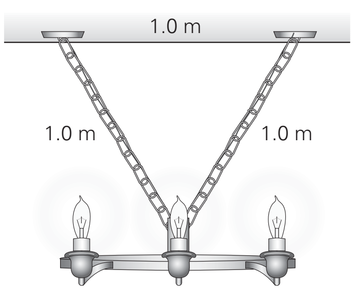
gramos) contenidas en una dieta de 2000 Calorías. ¿Qué cantidad máxima de grasa total y de grasa saturada se recomienda para una dieta de 2000 Calorías?

▲ **FIGURA 1.20 Hechos de nutrición** Véase el ejercicio 92.

93. ●● Se mide el espesor del total de páginas numeradas de un libro de texto y da 3.75 cm. *a*) Si la última página del libro lleva el número 860, ¿qué espesor promedio tiene una página? *b*) Repita empleando cálculos de orden de magnitud.

94. **IE** ●● Para ir a un estadio de fútbol desde su casa, usted primero conduce 1000 m al norte, luego 500 m al oeste y, por último, 1500 m al sur. *a*) Relativo a su casa, el estadio está 1) al norte del oeste, 2) al sur del este, 3) al norte del este o 4) al sur del oeste, *b*) ¿Qué distancia hay en línea recta de su casa al estadio?

95. ●● Se usan dos cadenas de 1.0 m de longitud para sostener una lámpara, como se muestra en la ▼figura 1.21. La distancia entre las dos cadenas es de 1.0 m en el techo. ¿Qué distancia vertical hay entre la lámpara y el techo?

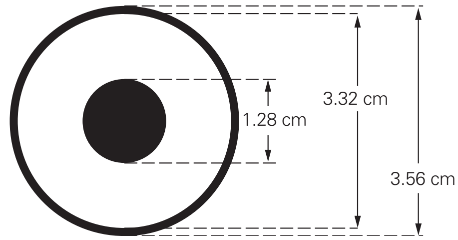


▲ **FIGURA 1.21 Soporte de la lámpara** Véase el ejercicio 95.

96. ●● El Palacio de las Pizzas de Tony vende una pizza mediana de 9.0 pulg (de diámetro) a $7.95 y una grande de 12 pulg a $13.50. ¿Qué pizza conviene más comprar?

97. ●● En la ▸figura 1.22, ¿qué región negra tiene mayor área, el círculo central o el anillo exterior?

98. ●● El Túnel del Canal, o "Chunnel", que cruza el Canal de la Mancha entre Gran Bretaña y Francia tiene 31 mi de longitud. (En realidad, hay tres túneles individuales.) Un tren



▲ **FIGURA 1.22 ¿Qué área negra es mayor?** Véase el ejercicio 97.

de trasbordo que lleva pasajeros por el túnel viaja con una rapidez promedio de 75 mi/h. ¿Cuántos minutos tarda en promedio el tren en cruzar el Chunnel en un sentido?

99. ●● La sangre de un ser humano adulto contiene el promedio de 7000/mm^3 de glóbulos blancos (leucocitos) y 250 000/mm^3 de plaquetas (trombocitos). Si una persona tiene un volumen de sangre de 5.0 L, estime el número total de glóbulos blancos y plaquetas en la sangre.

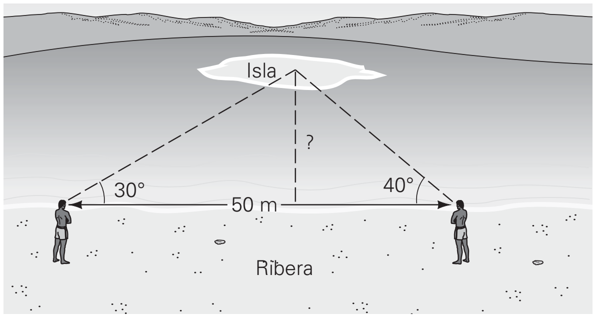
100. ●● Una área para césped de 10 ft por 20 ft se diseñó en un patio interior para colocar "losetas" de concreto circulares de 20 ft de diámetro, en un orden de manera que se tocaran entre sí. El césped existente se ajustará a los espacios libres. *a*) ¿Cuántas de esas losetas se requieren para hacer el trabajo? *b*) Cuando se termine el proyecto, ¿qué porcentaje del césped original se conservará?

101. ●● Experimentalmente, la fuerza que se siente en un automóvil debido a su movimiento a través del aire (inmóvil) varía aproximadamente como el cuadrado de la rapidez del automóvil. (Esta fuerza a veces se denomina "resistencia del aire".) Suponga que la fuerza varía exactamente como el cuadrado de la rapidez. Cerca de la ciudad a 30 mi/h, las mediciones indican que cierto automóvil experimenta una fuerza de resistencia del aire de 100 lb. ¿Qué magnitud de fuerza esperaría usted que el automóvil experimentara al viajar por la autopista a 65 mi/h?

102. ●● El número de cabellos en el cuero cabelludo normal es 125 000. Una persona saludable pierde cerca de 65 cabellos al día. (El nuevo cabello de los folículos pilosos expulsa el cabello viejo.) *a*) ¿Cuántos cabellos se pierden en un mes? *b*) La calvicie común (pérdida de cabello en la parte superior de la cabeza) afecta a cerca de 35 millones de hombres estadounidenses. Con un promedio de 15% del cuero cabelludo calvo, ¿cuántos cabellos pierde en un año uno de estos "calvos atractivos".

103. ●●● El lago Michigan, con una anchura y longitud aproximadas de 118 mi y 307 mi, respectivamente, y una profundidad media de 279 ft, es el segundo de los Grandes Lagos en volumen. Estime su volumen de agua en m^3.

104. **IE** ●●● En el Tour de Francia un competidor asciende por dos colinas sucesivas de diferentes pendiente y longitud. La primera tiene 2.00 km de longitud a un ángulo de 5° por encima de la horizontal. Ésta es inmediatamente seguida por una de 3.00 km a 7°. *a*) ¿Cuál será el ángulo general (neto) de principio a fin: 1) menor que 5°; 2) entre 5° y 7°, o 3) mayor que 7°? *b*) Calcule el verdadero ángulo general (neto) de ascenso experimentado por este competidor de principio a fin, para corroborar su razonamiento del inciso *a*).



▲ **FIGURA 1.23 Medición con visuales** Véase el ejercicio 105.

105. ●●● Un estudiante quiere determinar la distancia entre una isla pequeña y la orilla de un lago (▲figura 1.23). Primero traza una línea de 50 m paralela a la ribera. Luego se coloca en cada extremo de la línea y mide el ángulo entre la visual a la isla y la línea que trazó. Los ángulos son de 30° y 40°. ¿A qué distancia de la orilla está la isla?

Ejercicios adicionales

106. **IE** Un automóvil se conduce 13 millas al este y luego cierta distancia al norte hasta llegar a una posición que está 25° al norte del este de su posición inicial. *a*) La distancia recorrida por el automóvil directamente al norte es 1) menor que, 2) igual a o 3) mayor que 13 millas. ¿Por qué? *b*) ¿Qué distancia viaja el automóvil en dirección norte?

107. Un avión vuela 100 mi al sur, de la ciudad A a la ciudad B; 200 mi al este, de la ciudad B a la ciudad C, y luego 300 mi al norte, de la ciudad C a la ciudad D. *a*) ¿Qué distancia hay en línea recta de la ciudad A a la ciudad D? *b*) ¿En qué dirección está la ciudad D en relación con la ciudad A?

108. En un experimento de radiactividad, un ladrillo de plomo sólido (con las mismas medidas que un ladrillo de piso exterior de $2.00'' \times 4.00'' \times 8.00''$, excepto en que tiene una densidad que es 11.4 veces la del agua) se modifica para sostener una pieza cilíndrica de plástico sólido. Para realizar el experimento, se le pide un operador que perfore un agujero cilíndrico de 2.0 cm de diámetro en el centro del ladrillo, paralelo al lado más largo de éste. *a*) ¿Cuál es la masa del plomo (en kilogramos) que se removió del ladrillo? *b*) ¿Qué porcentaje del plomo original quedó en el ladrillo? *c*) Suponiendo que el agujero cilíndrico está completamente cubierto por el plástico (cuya densidad es dos veces superior a la del agua), determine la densidad general (promedio) de la combinación ladrillo/plástico después de que se termine el trabajo del taller.

109. Cierta noche un observador en la Tierra determina que el ángulo entre la dirección a Marte y la dirección al Sol es de 50°. En esa noche, suponiendo órbitas circulares, determine la distancia a Marte desde la tierra utilizando el radio conocido de las órbitas de ambos planetas.

110. Calcule el número de moléculas de agua en un vaso (8 oz exactamente) de agua 1 (fluido) = 0.0296 L. [*Sugerencia:* Quizás encuentre útil recordar que la masa de un átomo de hidrógeno es aproximadamente 1.67×10^{-27} kg y que la masa de un átomo de oxígeno es aproximadamente 16 veces ese valor.]

111. **IE** En las pruebas de tiempo de las 500 millas de Indianápolis, cada automóvil tiene la oportunidad de realizar cuatro vueltas consecutivas, y su velocidad general o promedio determina la posición de ese auto el día de la carrera. Cada vuelta cubre 2.5 mi (exactamente). Durante un recorrido de práctica, llevando su automóvil cuidadosa y gradualmente cada vez más rápido, un piloto registra la siguiente velocidad promedio para cada vuelta sucesiva: 160 mi/h, 180 mi/h, 200 mi/h y 220 mi/h. *a*) Su velocidad promedio será 1) exactamente el promedio de estas velocidades (190 mi/h), 2) mayor que 190 mi/h, o 3) menor que 190 mi/h. Explique. *b*) Para corroborar su razonamiento conceptual, calcule la velocidad promedio del automóvil.

112. Un estudiante que hace un experimento de laboratorio deja caer un pequeño cubo sólido dentro de un vaso cilíndrico con agua. El diámetro interior del vaso es 6.00 cm. El cubo se va al fondo y el nivel del agua en el vaso sube 1.00 cm. Si la masa del cubo es 73.6 g, *a*) determine la longitud de un lado del cubo, y *b*) calcule la densidad del cubo. (Por conveniencia, haga el ejercicio usando unidades del sistema cgs.)

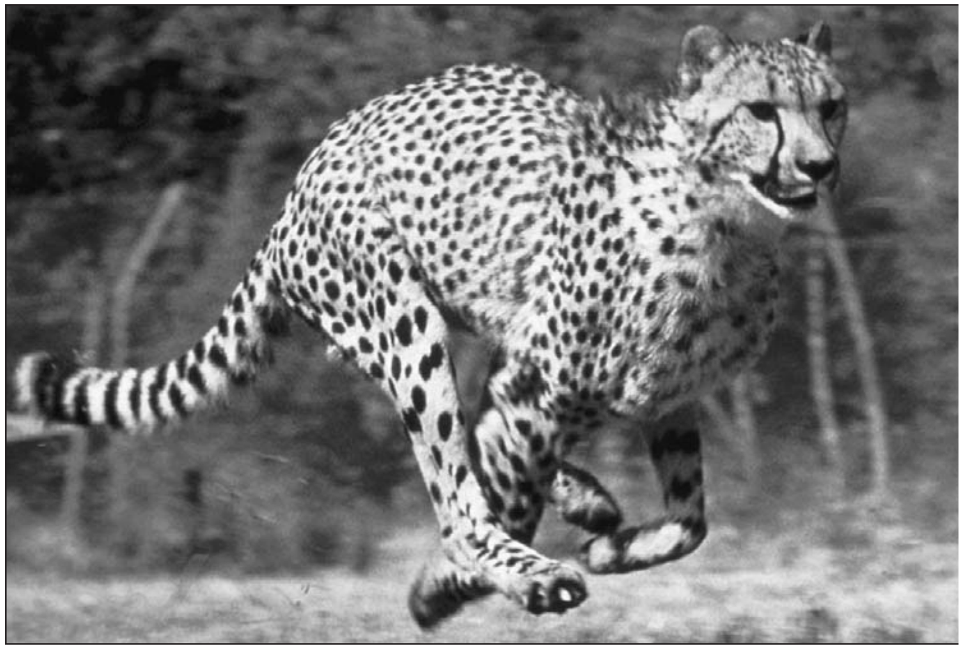
PHYSLET® **El siguiente problema de física Physlet puede usarse con este capítulo.**
1.1

CAPÍTULO 2

CINEMÁTICA: DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO

HECHOS DE FÍSICA

- "Denme materia y movimiento, y construiré el universo." René Descartes (1640).
- Nada puede exceder la rapidez de la luz (en el vacío), 3.0×10^8 m/s (186 000 mi/s).
- El avión a reacción y sin tripulación X-43A de la NASA es capaz de volar con una rapidez de 7700 km/h (4800 mi/h), más rápido que una bala disparada.
- La bala de un rifle de alto poder viaja con una rapidez aproximada de 2900 km/h (1800 mi/h).
- Las señales eléctricas entre el cerebro humano y los músculos viajan aproximadamente a 435 km/h (270 mi/h).
- Una persona en el ecuador viaja a una rapidez de 1600 km/h (1000 mi/h) a causa de la rotación de la Tierra.
- Rápido y lento (máxima rapidez aproximada):
  - Guepardo, 113 km/h (70 mi/h).
  - Caballo, 76 km/h (47 mi/h).
  - Galgo, 63 km/h (39 mi/h).
  - Conejo, 56 km/h (35 mi/h).
  - Gato, 48 km/h (30 mi/h).
  - Ser humano, 45 km/h (28 mi/h).
  - Pollo, 14 km/h (9 mi/h).
  - Caracol, 0.05 km/h (0.03 mi/h).
- Aristóteles pensaba que los objetos pesados caían más rápido que los ligeros. Galileo escribió: "Aristóteles afirma que una bola de hierro de 100 lb que cae desde una altura de 100 codos alcanza el suelo antes de que una bola de una libra haya caído desde una altura de un codo. Yo afirmo que ambas llegan al mismo tiempo."



El guepardo corre a todo galope. Es el más rápido de los animales terrestres y alcanza velocidades de hasta 113 km/h (70 mi/h). La sensación de movimiento es tan marcada en esta imagen capitular, que casi podemos sentir el paso del aire. Sin embargo, tal sensación de movimiento es una ilusión. El movimiento se da en el tiempo, pero la foto tan sólo puede "congelar" un instante. Veremos que, sin la dimensión del tiempo, prácticamente es imposible describir el movimiento.

La descripción del movimiento implica representar un mundo dinámico. Nada está perfectamente inmóvil. El lector podría sentarse, aparentemente en reposo, pero su sangre fluye, y el aire entra y sale de sus pulmones. El aire se compone de moléculas de gas que se mueven con diferente rapidez y en diferentes direcciones. Y, aunque experimente quietud, el lector, su silla, la construcción en que está y el aire que respira están girando en el espacio junto con la Tierra, que es parte de un sistema solar en una galaxia en movimiento espiral dentro de un universo en expansión.

La rama de la física que se ocupa del estudio del movimiento, lo que lo produce y lo afecta se llama **mecánica**. Los orígenes de la mecánica y del interés humano en el movimiento se remontan a las civilizaciones más antiguas. El estudio de los movimientos de los cuerpos celestes (la *mecánica celestial*) nació de la necesidad de medir el tiempo y la ubicación. Varios científicos de la antigua Grecia, entre quienes destacaba Aristóteles, propusieron teorías del movimiento que eran descripciones útiles, aunque más tarde se demostró que eran incorrectas o que estaban incompletas. Galileo (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1727) formularon buena parte de los conceptos sobre el movimiento que tiene amplia aceptación.

La mecánica suele dividirse en dos partes: 1) cinemática y 2) dinámica. La **cinemática** se ocupa de *describir* el movimiento de los objetos, sin considerar qué lo causa. La **dinámica** analiza las *causas* del movimiento. Este capítulo cubre la cinemática y reduce la descripción del movimiento a sus términos más simples considerando el movimiento en línea recta. Aprenderemos a analizar los cambios de movimiento: aceleración, disminución de la rapidez y parado. Al hacerlo, nos ocuparemos de un caso especialmente interesante del movimiento acelerado: caída libre bajo la influencia únicamente de la gravedad.

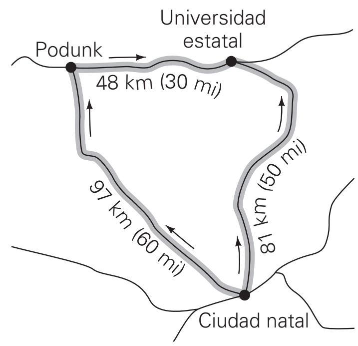
2.1 Distancia y rapidez: cantidades escalares

OBJETIVOS: *a*) Definir distancia y calcular rapidez, y *b*) explicar qué es una cantidad escalar.

Distancia

En nuestro entorno vemos muchos casos de movimiento. Pero ¿qué es movimiento? Esta pregunta parece sencilla; sin embargo, el lector podría tener problemas para dar una respuesta inmediata (y no se vale usar formas del verbo "mover" para describir el movimiento). Después de reflexionarlo un poco, seguramente usted llegará a la conclusión de que el **movimiento** (o moverse) implica un cambio de posición. El movimiento puede describirse en parte especificando *qué tan* lejos viaja algo al cambiar de posición; es decir, qué distancia recorre. **Distancia** es simplemente la *longitud total del trayecto* recorrido al moverse de un lugar a otro. Por ejemplo, el lector podría viajar en automóvil de su ciudad natal a la universidad y expresar la distancia recorrida en kilómetros o millas. En general, la distancia entre dos puntos depende del camino seguido (▸ figura 2.1).

Igual que muchas otras cantidades en física, la distancia es una **cantidad escalar**, que es una cantidad que sólo tiene magnitud, o tamaño. Es decir, un *escalar* sólo tiene un valor numérico, como 160 km o 100 mi. (Cabe señalar que la magnitud incluye unidades.) La distancia únicamente nos indica la magnitud: qué tan lejos, pero no qué tan lejos en alguna dirección. Otros ejemplos de escalares son cantidades como 10 s (tiempo), 3.0 kg (masa) y 20°C (temperatura). Algunos escalares tienen valores negativos, como −10°F.



▲ **FIGURA 2.1 Distancia: longitud total del trayecto** Al ir de su ciudad natal a la universidad estatal, un estudiante podría tomar la ruta más corta y recorrer una distancia de 81 km (50 mi). Otro estudiante sigue una ruta más larga para visitar a un amigo en Podunk antes de volver a la escuela. El viaje más largo tiene dos segmentos, pero la distancia recorrida es la longitud total, 97 km + 48 km = 145 km (90 mi).

Nota: una cantidad escalar tiene magnitud pero no dirección.

Rapidez

Cuando algo se mueve, su posición cambia con el tiempo. Es decir, el objeto se mueve cierta distancia en cierto tiempo. Por consiguiente, tanto la longitud como el tiempo son cantidades importantes para describir el movimiento. Por ejemplo, imaginemos un automóvil y un peatón que van por una calle y recorren la distancia (longitud) de una cuadra. Es de esperar que el automóvil viaje con mayor rapidez, y cubra la misma distancia en menos tiempo, que la persona. Esta relación longitud-tiempo puede expresarse utilizando la *razón* a la cual se recorre la distancia, es decir, la **rapidez**.

Rapidez media ($\bar{s}$) es la distancia d recorrida; es decir, la longitud real del camino dividida entre el tiempo total Δt que tomó recorrer esa distancia:

$$\text{rapidez media} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo total para recorrerla}}$$
$$\bar{s} = \frac{d}{\Delta t} = \frac{d}{t_2 - t_1} \qquad (2.1)$$

Unidad SI de rapidez: metros por segundo (m/s)

Un símbolo con una raya encima suele denotar un promedio. Se usa la letra griega Δ para representar un cambio o diferencia en una cantidad; en este caso, la diferencia de tiempo entre el inicio (t_1) y el final (t_2) de un viaje, o el tiempo transcurrido.

La unidad estándar de rapidez en el SI es metros por segundo (m/s, longitud/tiempo), aunque en muchas aplicaciones cotidianas se usa kilómetros por hora (km/h). La unidad inglesa estándar es pies por segundo (ft/s), pero con frecuencia también se usa millas por hora (mi/h). A menudo el tiempo inicial que se toma es cero, $t_1 = 0$, como cuando de resetea un cronómetro, de manera que la ecuación queda $s = d/t$, donde se entiende que t es el tiempo total.

Puesto que la distancia es un escalar (igual que el tiempo), la rapidez también es un escalar. La distancia *no* tiene que ser en línea recta. (Véase la figura 2.1.) Por ejemplo, usted seguramente habrá calculado la rapidez media de un viaje en automóvil

▲ **FIGURA 2.2** Rapidez instantánea El velocímetro de un automóvil da la rapidez en un intervalo de tiempo muy corto, así que su lectura se aproxima a la rapidez instantánea.

calculando la distancia a partir de las lecturas inicial y final del odómetro. Supongamos que dichas lecturas fueron 17 455 km y 17 775 km, respectivamente, para un viaje de cuatro horas. (Supondremos que el odómetro del automóvil marca kilómetros.) La resta de las lecturas da una distancia total recorrida d de 320 km, así que la rapidez media del viaje es $d/t = 320\ \text{km}/4.0\ \text{h} = 80\ \text{km/h}$ (o unas 50 mi/h).

La rapidez media da una descripción general del movimiento en un intervalo de tiempo Δt. En el caso del viaje en automóvil con una rapidez media de 80 km/h, la rapidez del vehículo no fue *siempre* 80 km/h. Con las diversas paradas durante el viaje, el automóvil se debe haber estado moviendo a menos de la rapidez promedio varias veces. Por lo tanto, tuvo que haberse estado moviendo a más de la rapidez media otra parte del tiempo. Una rapidez media no nos dice realmente con qué rapidez se estaba moviendo el automóvil en un instante dado durante el viaje. De forma similar, la calificación media que un grupo obtiene en un examen no nos indica la calificación de un estudiante en particular.

La **rapidez instantánea** es una cantidad que nos indica qué tan rápido se está moviendo *algo en un instante dado*. El velocímetro de un automóvil da una rapidez instantánea aproximada. Por ejemplo, el velocímetro de la ◂ figura 2.2 indica una rapidez de unas 44 mi/h, o 70 km/h. Si el automóvil viaja con rapidez constante (de manera que la lectura del velocímetro no cambie), la rapidez media y la instantánea serán iguales. (¿Está de acuerdo? Piense en la analogía de las calificaciones del examen anterior. ¿Qué sucede si todos los estudiantes obtienen la misma calificación?)

Ejemplo 2.1 ■ Movimiento lento: el vehículo Mars Exploration

En enero de 2004, el vehículo de exploración Mars Exploration tocó la superficie de Marte e inició un desplazamiento para explorar el planeta (◂ figura 2.3). La rapidez promedio de un vehículo de exploración sobre un suelo plano y duro es 5.0 cm/s. *a*) Suponiendo que el vehículo recorrió continuamente el terreno a esa rapidez promedio, ¿cuánto tiempo le tomaría recorrer 2.0 m en línea recta? *b*) Sin embargo, para garantizar un manejo seguro, el vehículo se equipó con software para evadir obstáculos, el cual hace que se detenga y evalúe su ubicación durante algunos segundos. De esta forma, el vehículo se desplaza a la rapidez promedio durante 10 s, luego se detiene y evalúa el terreno durante 20 s antes de seguir hacia adelante por otros 10 s; después se repite el ciclo. Tomando en cuenta esta programación, ¿cuál sería su rapidez promedio al recorrer los 2.0 m?

Razonamiento. *a*) Conociendo la rapidez promedio y la distancia, es posible calcular el tiempo a partir de la ecuación para la rapidez promedio (ecuación 2.1). *b*) Aquí, para calcular la rapidez promedio, debe utilizarse el tiempo total, incluidos los lapsos en que se detiene el vehículo.

▲ **FIGURA 2.3** Vehículo Mars Exploration La nave exploró varias zonas de Marte, buscando las respuestas sobre la existencia de agua en ese planeta.

Solución. Se listan los datos con sus unidades: (los cm/s se convierten directamente a m/s).

Dados:	***Encuentre:***
a) $\bar{s} = 5.0\ \text{cm/s} = 0.050\ \text{m/s}$	*a*) Δt (tiempo para recorrer la distancia)
$d = 2.0\ \text{m}$	*b*) $\bar{s}$ (rapidez promedio)
b) ciclos de 10 s de recorrido, altos de 20 s	

***a*)** A partir de la ecuación 2.1, tenemos $\bar{s} = \dfrac{d}{\Delta t}$

Reordenando,

$$\Delta t = \frac{d}{\bar{s}} = \frac{2.0\ \text{m}}{0.050\ \text{m/s}} = 40\ \text{s}$$

***b*)** Aquí necesitamos determinar el tiempo total para la distancia de 2.0 m. En cada intervalo de 10 s, se recorrería una distancia de $0.050\ \text{m/s} \times 10\ \text{s} = 0.50\ \text{m}$. Así, el tiempo total incluiría cuatro intervalos de 10 s para el recorrido real, y tres intervalos de 20 s para los altos, dado $\Delta t = 4 \times 10\ \text{s} + 3 \times 20\ \text{s} = 100\ \text{s}$. Entonces

$$\bar{s} = \frac{d}{\Delta t} = \frac{d}{t_2 - t_1} = \frac{2.0\ \text{m}}{100\ \text{s}} = 0.020\ \text{m/s}$$

Ejercicio de refuerzo. Suponga que la programación del vehículo de exploración fuera para recorridos de 5.0 s y altos de 10 s. ¿Cuánto tiempo le tomaría recorrer los 2.0 m en este caso? (*Las respuestas a todos los Ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.*)

2.2 Desplazamiento unidimensional y velocidad: cantidades vectoriales

OBJETIVOS: *a*) Definir desplazamiento y calcular velocidad, y *b*) explicar la diferencia entre cantidades escalares y vectoriales.

Desplazamiento

En el movimiento en línea recta, o rectilíneo, conviene especificar la posición usando el conocido sistema bidimensional de coordenadas cartesianas, con ejes x y y perpendiculares. Una trayectoria recta puede tener cualquier dirección, pero por conveniencia solemos orientar los ejes de coordenadas de manera que el movimiento siga uno de ellos. (Véase el ladillo Aprender dibujando.)

Como ya vimos, la distancia es una cantidad escalar que sólo tiene magnitud (y unidades). Sin embargo, al describir un movimiento podemos dar más información si especificamos una *dirección*. Esta información es especialmente sencilla cuando el cambio de posición es en línea recta. Definimos **desplazamiento** como la distancia en línea recta entre dos puntos, junto con la *dirección* del punto de partida a la posición final. A diferencia de la distancia (un escalar), el desplazamiento puede tener valores positivos o negativos, donde el signo indica la dirección a lo largo del eje de coordenadas.

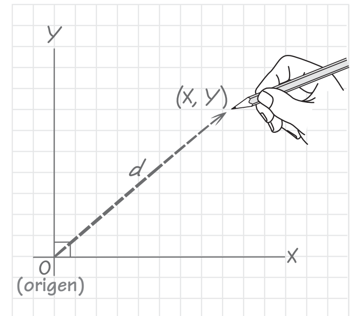
Por lo tanto, el desplazamiento es una **cantidad vectorial**. En otras palabras, un vector tiene tanto magnitud como dirección. Por ejemplo, cuando describimos el desplazamiento de un avión como 25 kilómetros al norte, estamos dando una descripción vectorial (magnitud y dirección). Otras cantidades vectoriales son velocidad y aceleración.

Podemos aplicar álgebra a los vectores; pero necesitamos saber cómo especificar y manejar la parte de dirección del vector. Este proceso es relativamente sencillo en una dimensión cuando se usan los signo + y − para indicar la dirección. Para ilustrar esto al calcular desplazamientos, consideremos la situación que se muestra en la ▼figura 2.4, donde x_1 y x_2 indican posiciones inicial y final, respectivamente, en el eje x, conforme un estudiante se mueve en línea recta de los casilleros al laboratorio de física. Como puede verse en la figura 2.4a, la distancia escalar que él recorre es 8.0 m. Para especificar desplazamiento (un vector) entre x_1 y x_2, usamos la expresión

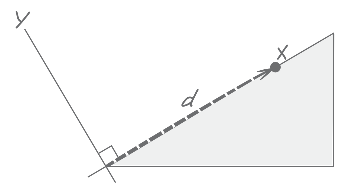
$$\Delta x = x_2 - x_1 \qquad (2.2)$$

APRENDER DIBUJANDO

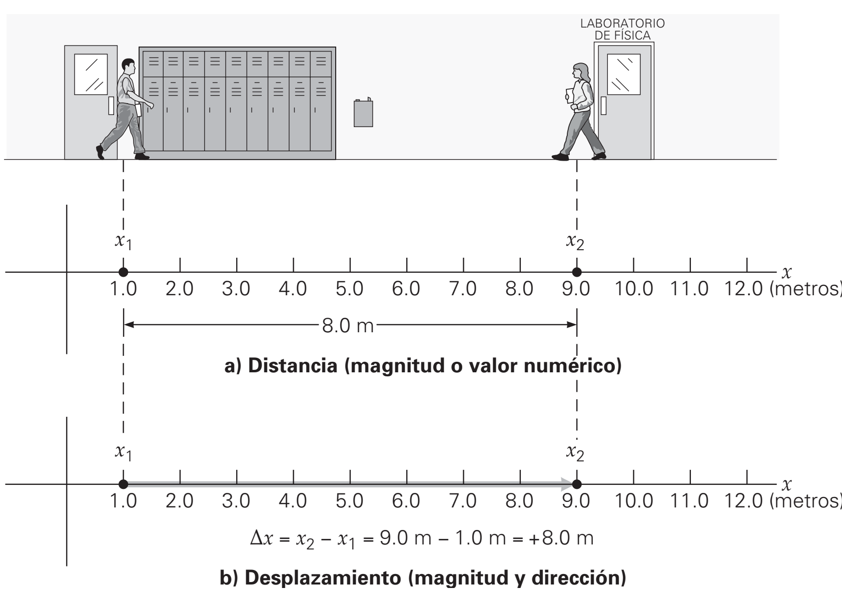
Coordenadas cartesianas y desplazamiento unidimensional



a) Sistema bidimensional de coordenadas cartesianas. Un vector de desplazamiento d ubica un punto (x, y)



b) En movimiento unidimensional, o rectilíneo, conviene orientar uno de los ejes de coordenadas en la dirección del movimiento



◀ **FIGURA 2.4 Distancia (escalar) y desplazamiento (vector)** *a*) La distancia (camino en línea recta) entre el estudiante y el laboratorio de física es 8.0 m y es una cantidad escalar. *b*) Para indicar desplazamiento, x_1 y x_2 especifican las posiciones inicial y final, respectivamente. El desplazamiento es entonces $\Delta x = x_2 - x_1 = 9.0\ \text{m} - 1.0\ \text{m} = +8.0\ \text{m}$; es decir, 8.0 m en la dirección x positiva.

donde Δ representa, una vez más, un cambio o diferencia en una cantidad. Entonces, como en la figura 2.4b, tenemos

$$\Delta x = x_2 - x_1 = +9.0 \text{ m} - (+1.0 \text{ m}) = +8.0 \text{ m}$$

Nota: Δ siempre significa *final menos inicial*, así como un *cambio* en un saldo bancario es el saldo final menos el saldo inicial.

Nota: si el desplazamiento es en *una dirección*, la distancia es la magnitud del desplazamiento.

donde el signo + indica las posiciones en el eje. Así, el desplazamiento (magnitud y dirección) del estudiante es 8.0 m en la dirección x positiva, como indica el resultado positivo (+) de la figura 2.4b. (Al igual que en las matemáticas "normales", suele omitirse el signo más, pues se sobreentiende, así que este desplazamiento se puede escribir como $\Delta x = 8.0$ m en vez de $\Delta x = +8.0$ m.)

En este libro, las cantidades vectoriales por lo regular se indican con negritas y una flecha arriba; por ejemplo, un vector de desplazamiento se indica con $\vec{\mathbf{d}}$ o $\vec{\mathbf{x}}$, y uno de velocidad, con $\vec{\mathbf{v}}$. No obstante, cuando se trabaja en una sola dimensión esa notación no es necesaria y se simplifica usando signos más y menos para indicar las únicas dos direcciones posibles. Por lo regular el eje x se utiliza para los movimientos horizontales, y un signo más (+) indica la dirección a la derecha, o en la "dirección x positiva", en tanto que un signo menos (−) indica la dirección a la izquierda, o la "dirección x negativa".

Tenga presente que estos signos sólo "apuntan" en *direcciones específicas*. Un objeto que se mueve sobre el eje x negativo hacia el origen se estaría moviendo en la dirección x positiva, aunque su valor sea negativa. ¿Y un objeto que se mueve sobre el eje x positivo hacia el origen? Si usted contestó en la dirección x negativa, está en lo correcto. En los diagramas las flechas del vector indican las direcciones de las magnitudes asociadas.

Supongamos que la otra estudiante de la figura 2.4 camina del laboratorio de física (la posición inicial es diferente, $x_1 = +9.0$ m) al final de los casilleros (la posición final ahora es $x_2 = +1.0$ m). Su desplazamiento sería

$$\Delta x = x_2 - x_1 = +1.0 \text{ m} - (+9.0 \text{ m}) = -8.0 \text{ m}$$

El signo menos indica que la dirección del desplazamiento fue en la dirección x negativa, o a la izquierda en la figura. En este caso, decimos que los desplazamientos de ambos estudiantes son iguales (en magnitud) y opuestos (en dirección).

Nota: no confunda velocidad (un vector) con rapidez (un escalar).

Velocidad

Como hemos visto, la rapidez, al igual que la distancia que implica, es una cantidad escalar: sólo tiene magnitud. Otra cantidad que se usa para describir mejor el movimiento es la *velocidad*. En la conversación cotidiana, solemos usar los términos rapidez y velocidad como sinónimos; sin embargo, en física tienen distinto significado. La rapidez es un escalar y la velocidad es un vector: tiene magnitud y dirección. A diferencia de la rapidez (pero igual que el desplazamiento), las velocidades unidimensionales puede tener valores positivos y negativos, que indican direcciones.

La **velocidad** nos dice qué tan rápidamente se está moviendo algo y en qué dirección se está moviendo. Así como podemos hablar de rapidez media e instantánea, tenemos velocidades media e instantánea que implican desplazamientos vectoriales. La **velocidad media** es el desplazamiento dividido entre el tiempo total de recorrido. En una dimensión, esto implica sólo movimiento a lo largo de un eje, que se considera el eje x. En este caso,

$$\text{velocidad media} = \frac{\text{desplazamiento}}{\text{tiempo total de recorrido}} \tag{2.3*}$$

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

Unidad SI de velocidad: metros por segundo (m/s)*

*Otra forma muy utilizada de esta ecuación es

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} = \frac{(x - x_o)}{(t - t_o)} = \frac{(x - x_o)}{t}$$

que, después de reacomodar, queda así:

$$x = x_o + \bar{v}t, \tag{2.3}$$

donde x_o es la posición inicial, x es la posición final y $\Delta t = t$ con $t_o = 0$. En la sección 2.3 se explica esta notación.

En el caso de más de un desplazamiento (desplazamientos sucesivos), la velocidad media es igual al desplazamiento total o neto, dividido entre el tiempo total. El desplazamiento total se obtiene sumando algebraicamente los desplazamientos, según los signos de dirección.

Quizá se pregunte si hay relación entre rapidez media y velocidad media. Un vistazo a la figura 2.4 muestra que, si todo el movimiento es en la misma dirección, es decir, si nunca se invierte la dirección, la distancia es igual a la magnitud del desplazamiento. De manera que la rapidez media es igual a la magnitud de la velocidad media. *No obstante, hay que tener cuidado*. Este conjunto de relaciones no se cumple si hay inversión de dirección, como en el ejemplo 2.2.

Ejemplo 2.2 ■ Ida y vuelta: velocidades medias

Un deportista trota de un extremo al otro de una pista recta de 300 m en 2.50 min y, luego, trota de regreso al punto de partida en 3.30 min. ¿Qué velocidad media tuvo el deportista *a*) al trotar al final de la pista, *b*) al regresar al punto de partida y *c*) en el trote total?

Nota: en el caso de desplazamientos tanto en la dirección + como − (inversión de dirección), la distancia no es la magnitud del desplazamiento total.

Razonamiento. Las velocidades medias se calculan a partir de la ecuación de definición. Cabe señalar que los tiempos dados son los Δt asociados con los desplazamientos en cuestión.

Solución. El problema nos dice que:

Dado:
$\Delta x_1 = 300$ m (tomando la dirección inicial como positiva)
$\Delta x_2 = -300$ m (tomando la dirección de regreso como negativa)
$\Delta t_1 = 2.50\text{ min }(60\text{ s/min}) = 150\text{ s}$
$\Delta t_2 = 3.30\text{ min }(60\text{ s/min}) = 198\text{ s}$

Encuentre: velocidades medias
a) el primer tramo,
b) el tramo de regreso,
c) el tramo total

a) La velocidad media al trotar hasta el final de la pista se calcula con la ecuación 2.3:

$$\bar{v}_1 = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = \frac{+300\text{ m}}{150\text{ s}} = +2.00\text{ m/s}$$

b) De forma similar, para el trote de regreso, tenemos

$$\bar{v}_2 = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} = \frac{-300\text{ m}}{198\text{ s}} = -1.52\text{ m/s}$$

c) Para el recorrido total, debemos considerar dos desplazamientos, de ida y de vuelta, así que los sumamos para obtener el desplazamiento total, que luego dividimos entre el tiempo total:

$$\bar{v}_3 = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2} = \frac{300\text{ m} + (-300\text{ m})}{150\text{ s} + 198\text{ s}} = 0\text{ m/s}$$

¡La velocidad media para el trote total es cero! ¿Ve el lector por qué? La definición de desplazamiento indica que la magnitud del desplazamiento es la distancia en línea recta entre dos puntos. El desplazamiento desde un punto regresando hasta ese mismo punto es cero; así que la velocidad media es cero. (Véase la ▸ figura 2.5.)

Podríamos haber encontrado el desplazamiento total con sólo calcular $\Delta x = x_{\text{final}} - x_{\text{inicial}} = 0 - 0 = 0$, donde las posiciones inicial y final se toman como el origen, pero lo hicimos en partes como ilustración.

Ejercicio de refuerzo. Calcule la rapidez media del deportista en cada caso del ejemplo, y compárela con las velocidades medias respectivas. [¿La rapidez media en *c*) será cero?] (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

▲ **FIGURA 2.5** ¡De vuelta a *home*! Pese a haber cubierto casi 110 m entre las bases, en el momento en que el corredor se barre en la caja de bateo (su posición original) para llegar a *home*, su desplazamiento es cero, al menos si es un bateador derecho. Por más rápidamente que haya corrido las bases, su velocidad media para todo el recorrido también es cero.

Como muestra el ejemplo 2.2, la velocidad media sólo ofrece una descripción general del movimiento. Una forma de estudiar más de cerca el movimiento es considerando intervalos de tiempo más pequeños, es decir, haciendo que el tiempo de observación (Δt) sea cada vez más pequeño. Al igual que la rapidez, cuando Δt se aproxima a cero, obtenemos la **velocidad instantánea**, que describe qué tan rápidamente y en qué dirección se está moviendo algo *en un momento específico*.

La velocidad instantánea se define matemáticamente así:

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{2.4}$$

Esta expresión se lee como "la velocidad instantánea es igual al límite de $\Delta x/\Delta t$ cuando Δt se aproxima a cero". El intervalo de tiempo nunca llega a cero (¿por qué?); pero *se aproxima* a cero. Técnicamente la velocidad instantánea aún es una velocidad media; sin embargo, un Δt tan pequeño es básicamente un promedio "en un instante de tiempo" y, por ello, la llamamos velocidad *instantánea*.

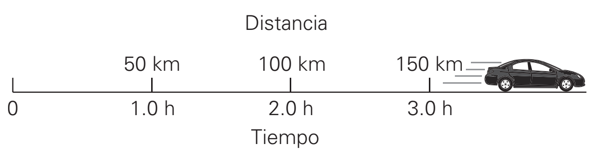
Nota: la palabra *uniforme* significa "constante".

Movimiento uniforme se refiere a un movimiento con velocidad constante (magnitud constante *y* dirección constante). Como ejemplo de una dimensión, el automóvil de la ▼figura 2.6 tiene una velocidad uniforme. Recorre la misma distancia y experimenta el mismo desplazamiento en intervalos de tiempo iguales (50 km en cada hora), y no cambia la dirección de su movimiento.

PHYSLET®
Ilustración 1.3 Obtención de datos

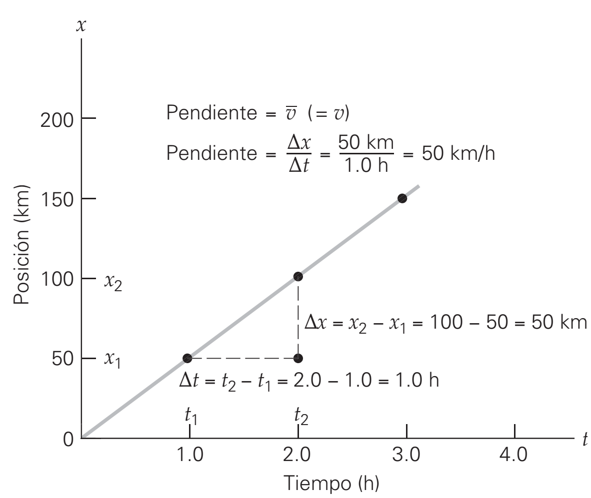
Análisis gráfico

El análisis gráfico a menudo es útil para entender el movimiento y las cantidades relacionadas con él. Por ejemplo, el movimiento del automóvil de la figura 2.6a podría representarse en una gráfica de posición contra tiempo, o x contra t. Como se observa en la figura 2.6b, se obtiene una línea recta para una velocidad uniforme, o constante, en una gráfica así.



Δx (km)	Δt (h)	$\Delta x/\Delta t$
50	1.0	50 km/1.0 h = 50 km/h
100	2.0	100 km/2.0 h = 50 km/h
150	3.0	150 km/3.0 h = 50 km/h

a)



Velocidad uniforme

b)

▶ **FIGURA 2.6 Movimiento rectilíneo uniforme: velocidad constante** En el movimiento rectilíneo uniforme, un objeto viaja con velocidad constante, cubriendo la misma distancia en intervalos de tiempo iguales, ***a)*** Aquí, un automóvil recorre 50 km cada hora. ***b)*** Una gráfica de x contra t es una línea recta, pues se cubren desplazamientos iguales en tiempos iguales. El valor numérico de la pendiente de la línea es igual a la magnitud de la velocidad, y el signo de la pendiente da su dirección. (La velocidad media es igual a la velocidad instantánea en este caso. ¿Por qué?)

PHYSLET®
Ilustración 2.1 Posición y desplazamiento

PHYSLET®
Exploración 2.1 Compare posición contra tiempo y velocidad contra gráficos de tiempo

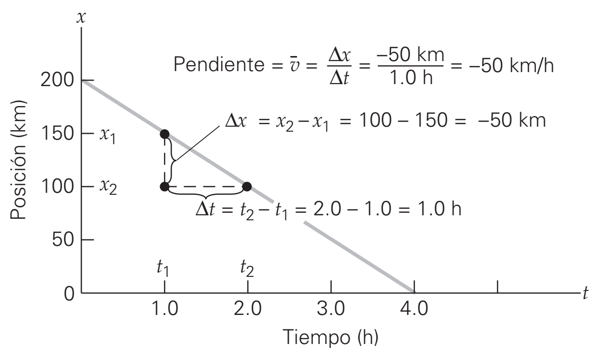


FIGURA 2.7 Gráfica de posición contra tiempo para un objeto que se mueve uniformemente en la dirección *x* negativa Una línea recta con pendiente negativa en una gráfica de x contra t indica movimiento uniforme en la dirección x negativa. Observe que la posición del objeto cambia de forma constante. En $t = 4.0$ h, el objeto está en $x = 0$. ¿Qué aspecto tendría la gráfica si el movimiento continuara durante $t > 4.0$ h?

Recordemos que en las gráficas cartesianas de y contra x la pendiente de una recta está dada por $\Delta y/\Delta x$. Aquí, con una gráfica de x contra t, la pendiente de la línea, $\Delta x/\Delta t$, es igual a la velocidad media $\bar{v} = \Delta x/\Delta t$. En movimiento uniforme, este valor es igual a la velocidad instantánea. Es decir, $\bar{v} = v$. (¿Por qué?) El valor numérico de la pendiente es la magnitud de la velocidad, y el signo de la pendiente da la dirección. Una pendiente positiva indica que x aumenta con el tiempo, de manera que el movimiento es en la dirección x positiva. (El signo más suele omitirse, porque se sobreentiende, y así lo haremos a lo largo de este texto.)

PHYSLET®

Exploración 2.2 *Determine la gráfica correcta*

Suponga que una gráfica de posición contra tiempo para el movimiento de un automóvil es una línea recta con pendiente negativa, como en la ▲figura 2.7. ¿Qué indica esta pendiente? Como se aprecia en la figura, los valores de posición (x) disminuyen con el tiempo a una tasa constante, lo cual indica que el automóvil viaja con movimiento uniforme, aunque en la dirección x negativa, lo cual se relaciona con el valor negativo de la pendiente.

En la mayoría de los casos, el movimiento de un objeto *no es uniforme*, lo cual significa que se cubren diferentes distancias en intervalos de tiempo iguales. Una gráfica de x contra t para un movimiento así en una dimensión es una línea curva, como la de la ▼figura 2.8. La velocidad media del objeto en un intervalo de tiempo dado es la pendiente de una recta que pasa entre los dos puntos de la curva que corresponden a los tiempos inicial y final del intervalo. En la figura, como $\bar{v} = \Delta x/\Delta t$, la velocidad media para todo el viaje es la pendiente de la línea recta que une los puntos inicial y final de la curva.

PHYSLET®

Ilustración 2.2 *Velocidad promedio*

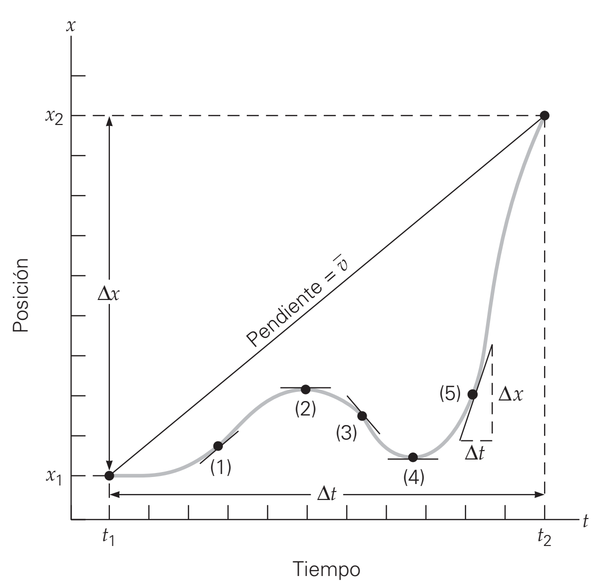


FIGURA 2.8 Gráfica de posición contra tiempo para un objeto en movimiento rectilíneo no uniforme Si la velocidad no es uniforme, una gráfica de x contra t es una curva. La pendiente de la línea entre dos puntos es la velocidad media entre esos dos puntos, y la velocidad instantánea es la pendiente de una línea tangente a la curva en cualquier punto. Se muestran cinco líneas tangentes, con los intervalos $\Delta x/\Delta t$ para la quinta. ¿Puede el lector describir el movimiento del objeto con palabras?

Ilustración 2.3 ***Velocidad promedio y velocidad instantánea***

La velocidad instantánea es igual a la pendiente de una línea recta tangente a la curva en un momento específico. En la figura 2.8 se muestran cinco líneas tangentes comunes. En (1), la pendiente es positiva y, por lo tanto, el movimiento es en la dirección x positiva. En (2), la pendiente de una línea tangente horizontal es cero, así que no hay movimiento. Es decir, el objeto se detuvo instantáneamente ($v = 0$). En (3), la pendiente es negativa, de manera que el objeto se está moviendo en la dirección x negativa. Entonces, el objeto se detuvo y cambió de dirección en el punto (2). ¿Qué está sucediendo en los puntos (4) y (5)?

Si dibujamos diversas líneas tangentes a lo largo de la curva, vemos que sus pendientes varían, lo cual indica que la velocidad instantánea está cambiando con el tiempo. Un objeto en movimiento no uniforme puede acelerarse, frenarse o cambiar de dirección. La forma de describir un movimiento con velocidad cambiante es el tema de la sección 2.3.

2.3 Aceleración

OBJETIVOS: *a*) Explicar la relación entre velocidad y aceleración, y *b*) realizar un análisis gráfico de la aceleración.

La descripción básica del movimiento implica la tasa de cambio de posición con el tiempo, que llamamos *velocidad*. Podemos ir un poco más lejos y considerar cómo cambia esa *tasa de cambio*. Supongamos que algo se está moviendo a velocidad constante y luego la velocidad cambia. Semejante cambio de velocidad se denomina *aceleración*. En un automóvil, llamamos *acelerador* al pedal de la gasolina. Cuando pisamos el acelerador, el automóvil aumenta su velocidad; si levantamos el pie, el automóvil baja la velocidad. En ambos casos, hay un cambio de velocidad con el tiempo. Definimos **aceleración** como la tasa de cambio de la velocidad con el tiempo.

La aceleración media es análoga a la **velocidad media**, es decir, es el cambio de velocidad dividido entre el tiempo que toma realizar ese cambio:

$$\text{aceleración media} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{tiempo que toma el cambio}} \tag{2.5}$$

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$= \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{v - v_o}{t - t_o}$$

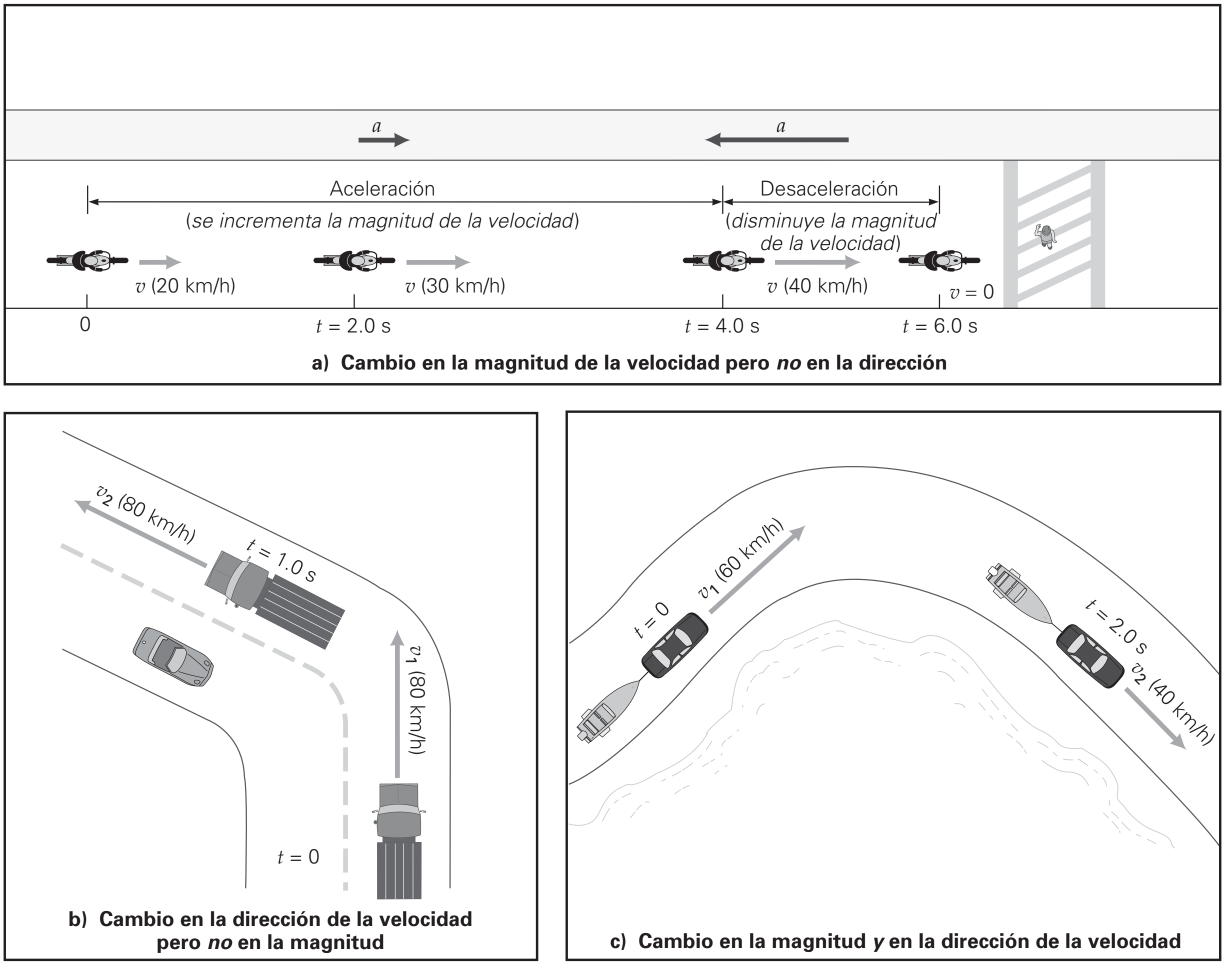
Unidad SI de aceleración: metros por segundo al cuadrado (m/s^2).

Observe que sustituimos las variables inicial y final con una notación más común. v_o y t_o son la velocidad y el tiempo iniciales u originales, respectivamente, y v y t son la velocidad y el tiempo generales en algún momento futuro, cuando queremos conocer la velocidad v después de cierto tiempo específico t. (Ésta podría o no ser la velocidad final de una situación dada.)

A partir de $\Delta v/\Delta t$, las unidades SI de aceleración son metros por segundo (Δv) por segundo (Δt), es decir, $(m/s)/s$ o $m/(s \cdot s)$, que comúnmente se expresa como metros por segundo al cuadrado (m/s^2). En el sistema inglés, las unidades son pies por segundo al cuadrado (ft/s^2).

Nota: en unidades compuestas, la multiplicación se indica con un punto centrado.

Como la velocidad es una cantidad vectorial, también lo es la aceleración, pues ésta representa un cambio de velocidad. Puesto que la velocidad tiene tanto magnitud como dirección, un cambio de velocidad implicaría cambios en cualquiera de estos factores, o en ambos. Por lo tanto, una aceleración podría deberse a un cambio de *rapidez* (la magnitud), un cambio de *dirección* o un cambio en *ambas*, como se muestra en la ▸figura 2.9.



a) Cambio en la magnitud de la velocidad pero *no* en la dirección

b) Cambio en la dirección de la velocidad pero *no* en la magnitud

c) Cambio en la magnitud *y* en la dirección de la velocidad

▲ **FIGURA 2.9 Aceleración: la tasa de cambio de la velocidad con el tiempo** Puesto que la velocidad es una cantidad vectorial, con magnitud y dirección, puede haber una aceleración cuando hay ***a)*** un cambio de magnitud, pero no de dirección, ***b)*** un cambio de dirección, pero no de magnitud, o ***c)*** un cambio tanto de magnitud como de dirección.

En el caso del movimiento rectilíneo, usaremos signos más y menos para indicar las direcciones de velocidad y aceleración, como hicimos con el desplazamiento lineal. La ecuación 2.5 suele simplificarse como:

$$\bar{a} = \frac{v - v_o}{t} \tag{2.6}$$

donde se supone que $t_o = 0$. (v_o podría no ser cero, así que por lo general no podemos omitirla.)

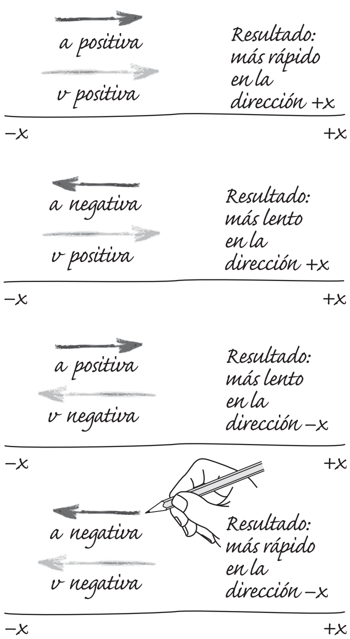
La aceleración instantánea, análoga a la **velocidad instantánea**, es la aceleración en un instante específico. Esta cantidad se expresa matemáticamente como:

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{2.7}$$

Las condiciones del intervalo de tiempo cercano a cero son las que se describieron para la velocidad instantánea.

APRENDER DIBUJANDO

Signos de la velocidad y la aceleración



Ejemplo 2.3 ■ Frenado: aceleración media

Un matrimonio viaja en una camioneta SUV a 90 km/h por una carretera recta. Ven un accidente a lo lejos, así que el conductor disminuye su velocidad a 40 km/h en 5.0 s. ¿Qué aceleración media tuvo la camioneta?

Razonamiento. Para calcular la aceleración media, se necesitan las variables definidas en la ecuación 2.6, y se han dado.

Solución. Del planteamiento del problema, tenemos los siguientes datos:

Dado:
$$v_o = (90\ \cancel{\text{km/h}})\left(\frac{0.278\ \text{m/s}}{1\ \cancel{\text{km/h}}}\right) = 25\ \text{m/s}$$
$$v = (40\ \cancel{\text{km/h}})\left(\frac{0.278\ \text{m/s}}{1\ \cancel{\text{km/h}}}\right) = 11\ \text{m/s}$$
$$t = 5.0\ \text{s}$$

Encuentre: $\bar{a}$ (aceleración media)

[Aquí, suponemos que las velocidades instantáneas tienen dirección positiva, y se efectúan de inmediato las conversiones a unidades estándar (metros por segundo), ya que el tiempo se dio en segundos. En general, siempre trabajamos con unidades estándar.]

Dadas las velocidades inicial y final y el intervalo de tiempo, podemos calcular la aceleración media con la ecuación 2.6:

$$\bar{a} = \frac{v - v_o}{t} = \frac{11\ \text{m/s} - (25\ \text{m/s})}{5.0\ \text{s}} = -2.8\ \text{m/s}^2$$

El signo menos indica la dirección de la aceleración (del vector). En este caso, la dirección es opuesta a la dirección del movimiento ($v > 0$), y el automóvil se frena. A veces llamamos *desaceleración* a una aceleración negativa.

Ejercicio de refuerzo. ¿Una aceleración negativa necesariamente implica que el objeto en movimiento está desacelerando, o que su rapidez está disminuyendo? *Sugerencia:* véase la sección lateral "Aprender dibujando". (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Aceleración constante

Aunque la aceleración puede variar con el tiempo, por lo general restringiremos nuestro estudio del movimiento a aceleraciones constantes, para simplificar. (Una aceleración constante importante es aquella debida a la gravedad cerca de la superficie terrestre, que estudiaremos en la siguiente sección.) Puesto que en el caso de una aceleración constante el promedio es igual al valor constante ($\bar{a} = a$), podemos omitir la raya sobre la aceleración en la ecuación 2.6. Así, para una aceleración constante, la ecuación que relaciona velocidad, aceleración y tiempo suele escribirse como sigue (reacomodando la ecuación 2.6):

$$v = v_o + at \quad \textit{(sólo aceleración constante)} \tag{2.8}$$

(Cabe señalar que el término *at* representa el *cambio* de velocidad, ya que $at = v - v_o = \Delta v$.)

Ejemplo 2.4 ■ Arranque rápido, frenado lento: movimiento con aceleración constante

Un automóvil para "arrancones" que parte del reposo acelera en línea recta con una tasa constante de 5.5 m/s^2 durante 6.0 s. *a*) ¿Qué velocidad tiene el vehículo al final de ese periodo? *b*) Si en ese momento el carro despliega un paracaídas que lo frena con una tasa uniforme de 2.4 m/s^2, ¿cuánto tardará en detenerse?

Razonamiento. El vehículo primero acelera y luego frena, por lo que debemos fijarnos bien en los signos de dirección de las cantidades vectoriales. Elegimos un sistema de coordenadas con la dirección positiva en la dirección de la velocidad inicial. (Diagrame la situación.) Entonces podremos obtener las respuestas usando las ecuaciones adecuadas. Note que hay dos fases diferentes para el movimiento y, por lo tanto, dos aceleraciones diferentes. Vamos a distinguir tales fases con los subíndices 1 y 2.

Solución. Tomando el movimiento inicial en la dirección positiva, tenemos estos datos:

Dado: *a*) $v_o = 0$ (en reposo)
$a_1 = 5.5\ \text{m/s}^2$
$t_1 = 6.0\ \text{s}$
b) $v_o = v_1$ [del inciso *a*)]
$v_2 = 0$ (se detiene)
$a_2 = -2.4\ \text{m/s}^2$ (dirección opuesta de v_o)

Encuentre: *a*) v_1 (velocidad final para la primera fase de movimiento)
b) t_2 (tiempo para la segunda fase de movimiento)

Hemos presentado los datos en dos partes. Esto ayuda a no confundirse con los símbolos. Observe que la velocidad final v_1 que se calculará en el inciso *a* será la velocidad inicial v_o en el inciso *b*.

***a*)** Para obtener la velocidad final, v, usamos directamente la ecuación 2.8:

$$v_1 = v_o + a_1 t_1 = 0 + (5.5\ \text{m/s}^2)(6.0\ \text{s}) = 33\ \text{m/s}$$

***b*)** Aquí, queremos hallar el tiempo, así que despejamos t_2 de la ecuación 2.6 y usamos $v_o = v_1 = 33$ m/s del inciso *a* para obtener,

$$t_2 = \frac{v_2 - v_o}{a_2} = \frac{0 - (33\ \text{m/s})}{-2.4\ \text{m/s}^2} = 14\ \text{s}$$

Observe que el tiempo es positivo, como tendría que ser.

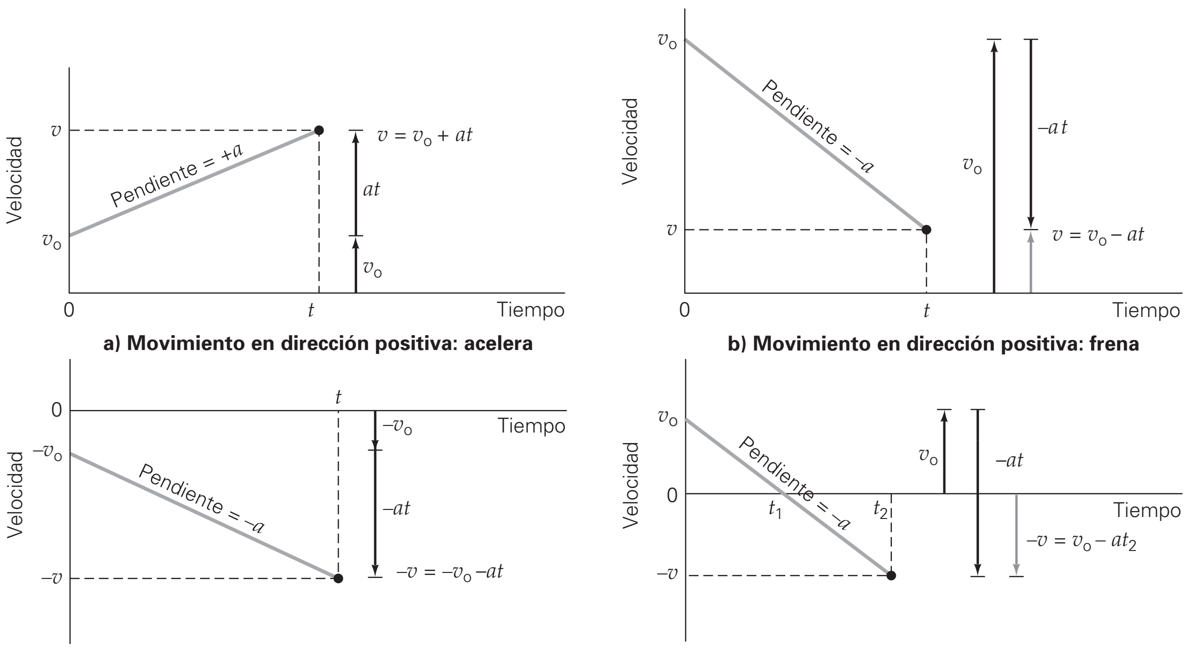
Ejercicio de refuerzo. ¿Qué velocidad instantánea tiene el carro 10 segundos después de desplegar el paracaídas? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Es fácil representar gráficamente movimientos con aceleración constante graficando la velocidad instantánea contra el tiempo. En este caso una gráfica de v contra t es una recta cuya pendiente es igual a la aceleración, como se muestra en la ▼figura 2.10. Note que la ecuación 2.8 se puede escribir como $v = at + v_o$ que, como reconocerá el lector, tiene la forma de la ecuación de una línea recta, $y = mx + b$ (pendiente m e intersección b).

PHYSLET®

Ilustración 2.5 Movimiento en una columna o en una rampa

▼ **FIGURA 2.10 Gráficas de velocidad contra tiempo para movimientos con aceleración constante** La pendiente de una gráfica de v contra t es la aceleración. *a*) Una pendiente positiva indica un aumento de velocidad en la dirección positiva. Las flechas verticales a la derecha indican cómo la aceleración añade velocidad a la velocidad inicial v_o. *b*) Una pendiente negativa indica una disminución de la velocidad inicial v_o, es decir, una desaceleración. *c*) Aquí, una pendiente negativa indica una aceleración negativa, pero la velocidad inicial es en la dirección negativa, $-v_o$, así que la rapidez del objeto aumenta en esa dirección. *d*) La situación inicial aquí es similar a la del inciso *b*, pero termina pareciéndose a la de *c*. ¿Puede el lector explicar qué sucedió en el tiempo t_1?



a) Movimiento en dirección positiva: acelera

b) Movimiento en dirección positiva: frena

c) Movimiento en dirección negativa: acelera

d) Cambio de dirección

PHYSLET®

Exploración 2.3 Una cortina tapa tu visión de la pelota de golf

En la figura 2.10a, el movimiento es en la dirección positiva, y la aceleración aumenta la velocidad después de un tiempo t, como indican las flechas verticales a la derecha de la gráfica. Aquí, la pendiente es positiva ($a > 0$). En la figura 2.10b, la pendiente negativa ($a < 0$) indica una aceleración negativa que produce un frenado o desaceleración. Sin embargo, la figura 2.10c ilustra cómo una aceleración negativa puede aumentar la velocidad (cuando el movimiento es en la dirección negativa). La situación en la figura 2.10d es un poco más compleja. ¿Puede el lector explicar qué está sucediendo ahí?

Cuando un objeto se mueve con aceleración constante, su velocidad cambia en la misma cantidad en cada unidad de tiempo. Por ejemplo, si la aceleración es de 10 m/s^2 en la misma dirección que la velocidad inicial, la velocidad del objeto aumentará en 10 m/s cada segundo. Supongamos que el objeto tiene una velocidad inicial v_o de 20 m/s en una dirección específica $t_o = 0$. Entonces, para $t = 0$, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 s, las velocidades son 20, 30, 40, 50 y 60 m/s, respectivamente.

La velocidad media podría calcularse de la forma acostumbrada (ecuación 2.3), pero también podríamos reconocer de inmediato que la serie uniformemente creciente de números 20, 30, 40, 50 y 60 tiene un valor medio de 40 (el valor que está en el punto medio de la serie), y $\bar{v} = 40$ m/s. Note que el promedio de los valores inicial y final también da el promedio de la serie; es decir, $(20 + 60)/2 = 40$. Sólo cuando la velocidad cambia a una tasa uniforme debido a una aceleración constante, $\bar{v}$ es el promedio de las velocidades inicial y final:

$$\bar{v} = \frac{v + v_o}{2} \quad \textit{(sólo aceleración constante)} \tag{2.9}$$

Ejemplo 2.5 ■ En el agua: uso de múltiples ecuaciones

En un lago una lancha de motor que parte del reposo acelera en línea recta con una tasa constante de 3.0 m/s^2 durante 8.0 s. ¿Qué distancia recorre en ese tiempo?

Razonamiento. Sólo tenemos una ecuación para distancia (ecuación 2.3, $x = x_o + \bar{v}t$), pero no podemos usarla directamente. Primero debemos calcular la velocidad media, así que necesitaremos ecuaciones y pasos múltiples.

Solución. Después de leer el problema, resumir los datos e identificar lo que se pide (suponiendo que la lancha acelera en la dirección $+x$), tenemos:

Dado: $x_o = 0$
$v_o = 0$
$a = 3.0$ m/s^2
$t = 8.0$ s

Encuentre: x (distancia)

(Observe que todas las unidades son estándar.)

Al analizar el problema, podríamos razonar como sigue: para obtener x, tendremos que usar la ecuación 2.3 como $x = x_o + \bar{v}t$. (Debemos usar la velocidad media $\bar{v}$ porque la velocidad está cambiando, así que no es constante.) Como se nos dio el tiempo, ya sólo nos falta obtener $\bar{v}$. Por la ecuación 2.9, $\bar{v} = (v + v_o)/2$, y, con $v_o = 0$ sólo necesitamos la velocidad final v para resolver el problema. La ecuación 2.8, $v = v_o + at$, nos permite calcular v a partir de los datos. Así pues, tenemos:

La velocidad de la lancha al término de 8.0 s es

$$v = v_o + at = 0 + (3.0\ \text{m/s}^2)(8.0\ \text{s}) = 24\ \text{m/s}$$

La velocidad media en ese intervalo de tiempo es

$$\bar{v} = \frac{v + v_o}{2} = \frac{24\ \text{m/s} + 0}{2} = 12\ \text{m/s}$$

Por último, la magnitud del desplazamiento, que en este caso es igual a la distancia recorrida, está dada por la ecuación 2.3 (teniendo la posición inicial de la lancha como el origen, $x_o = 0$):

$$x = \bar{v}t = (12\ \text{m/s})(8.0\ \text{s}) = 96\ \text{m}$$

Ejercicio de refuerzo. (Avance.) En la sección 2.4 deduciremos la siguiente ecuación: $x = v_o t + \frac{1}{2}at^2$. Utilice los datos de este ejemplo para saber si esta ecuación da la distancia recorrida. (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

2.4 Ecuaciones de cinemática (aceleración constante)

OBJETIVOS: *a*) Explicar las ecuaciones de cinemática para aceleración constante y *b*) aplicarlas a situaciones físicas.

Sólo necesitamos tres ecuaciones básicas para describir los movimientos en una dimensión con aceleración constante. En las secciones anteriores vimos que esas ecuaciones son:

$$x = x_o + \bar{v}t \tag{2.3}$$

$$\bar{v} = \frac{v + v_o}{2} \quad \textit{(sólo aceleración constante)} \tag{2.9}$$

$$v = v_o + at \quad \textit{(sólo aceleración constante)} \tag{2.8}$$

(Cabe señalar que la primera ecuación, ecuación 2.3, es general y no está limitada a situaciones de aceleración constante, como las otras dos ecuaciones.)

Sin embargo, como vimos en el ejemplo 2.5, la descripción del movimiento en algunos casos requiere aplicar varias de tales ecuaciones, lo cual quizá no sea evidente al principio. Sería útil reducir el número de operaciones que deben efectuarse para resolver problemas de cinemática, y podemos lograrlo combinando ecuaciones algebraicamente.

Por ejemplo, suponga que queremos una expresión que dé la ubicación x en términos del tiempo y la aceleración, y no en términos del tiempo ni de la velocidad media (como en la ecuación 2.3). Podemos eliminar $\bar{v}$ de la ecuación 2.3 sustituyendo $\bar{v}$ de la ecuación 2.9 en la ecuación 2.3:

$$x = x_o + \bar{v}t$$

y

$$x = x_o + \tfrac{1}{2}(v + v_o)t \quad \textit{(sólo aceleración constante)} \tag{2.10}$$

Entonces, al sustituir v de la ecuación 2.8, obtenemos

$$x = x_o + \tfrac{1}{2}(v_o + at + v_o)t$$

Al simplificar,

$$x = x_o + v_o t + \tfrac{1}{2}at^2 \quad \textit{(sólo aceleración constante)} \tag{2.11}$$

PHYSLET®

Exploración 2.4 Determine x(t) de un Monster Truck

En esencia, realizamos esta serie de pasos en el ejemplo 2.5. La ecuación combinada permite calcular directamente la distancia recorrida por la lancha de ese ejemplo:

$$x - x_o = \Delta x = v_o t + \tfrac{1}{2}at^2 = 0 + \tfrac{1}{2}(3.0\ \text{m/s}^2)(8.0\ \text{s})^2 = 96\ \text{m}$$

Es mucho más fácil, ¿no?

Nota: $\Delta x = x - x_o$ es desplazamiento, pero con $x_o = 0$, como suele ser, $\Delta x = x$, y el valor de la posición x es el mismo que el del desplazamiento. Esto nos ahorra tener que escribir siempre $\Delta x = x - x_o$.

Quizá deseamos una expresión que dé la velocidad en función de la posición x, no del tiempo (como en la ecuación 2.8). Podemos eliminar t de la ecuación 2.8 usando la ecuación 2.10 en la forma

$$v + v_o = 2\frac{(x - x_o)}{t}$$

Entonces, al multiplicar esta ecuación por la ecuación 2.8 en la forma $(v - v_o) = at$ tenemos

$$(v + v_o)(v - v_o) = 2a(x - x_o)$$

y utilizando la relación $v^2 - v_o^2 = (v + v_o)(v - v_o)$, para obtener

$$v^2 = v_o^2 + 2a(x - x_o) \quad \textit{(sólo aceleración constante)} \tag{2.12}$$

Ilustración 2.4 Aceleración constante y medición

Sugerencia para resolver problemas

Los estudiantes de cursos de introducción a la física a veces se sienten abrumados por las diversas ecuaciones de cinemática. No hay que olvidar que las ecuaciones y las matemáticas son las herramientas de la física. Todo mecánico o carpintero sabe que las herramientas facilitan el trabajo en la medida en que uno las conoce y sabe usarlas. Lo mismo sucede con las herramientas de la física.

Si resumimos las ecuaciones para movimiento rectilíneo con aceleración *constante* tenemos:

$$v = v_o + at \tag{2.8}$$

$$x = x_o + \tfrac{1}{2}(v + v_o)t \tag{2.10}$$

$$x = x_o + v_o t + \tfrac{1}{2}at^2 \tag{2.11}$$

$$v^2 = v_o^2 + 2a(x - x_o) \tag{2.12}$$

Este conjunto de ecuaciones se utiliza para resolver la mayoría de los problemas de cinemática. (Ocasionalmente, nos interesará una rapidez o una velocidad media pero, como ya señalamos, en general los promedios no nos dicen mucho.)

Observe que todas las ecuaciones de la lista tienen cuatro o cinco variables. Es preciso conocer todas las variables de una ecuación, menos una, para calcular lo que nos interesa. Por lo común elegimos una ecuación con la incógnita o la cantidad que se busca. Pero, como señalamos, hay que conocer las otras variables de la ecuación. Si no es así, entonces se habrá elegido la ecuación incorrecta y deberá utilizarse otra ecuación para encontrar la variable. (Otra posibilidad es que no se hayan dado los datos suficientes para resolver el problema, aunque ése no sería el caso en este libro de texto.)

Siempre hay que intentar entender y visualizar los problemas. Una lista de los datos, como la que se describe en el procedimiento para resolver problemas sugerido en el capítulo 1, nos ayudaría a decidir qué ecuación usar, pues nos indica las variables conocidas y las incógnitas. Recuerde esta estrategia al resolver los demás ejemplos de este capítulo. También es importante no pasar por alto *datos implícitos*, error que ilustra el ejemplo 2.6.

Exploración 2.5 Determine $x(t)$ y $v(t)$ del Lamborghini

Ejemplo conceptual 2.6 ■ ¡Algo está mal!

Un estudiante trabaja en un problema en el que interviene un objeto que acelera de manera constante; el estudiante quiere encontrar v. Se sabe que $v_o = 0$ y $t = 3.0$ s, pero no se conoce la aceleración a. Él examina las ecuaciones cinemáticas y decide, utilizando $v = at$ y $x = \frac{1}{2}at^2$ (con $x_o = v_o = 0$), que puede eliminarse la incógnita a. Con $a = v/t$ y $a = 2x/t^2$ e igualando,

$$v/t = 2x/t^2$$

pero x no se conoce, así que decide emplear $x = vt$ para eliminarla, y

$$v/t = 2vt/t^2$$

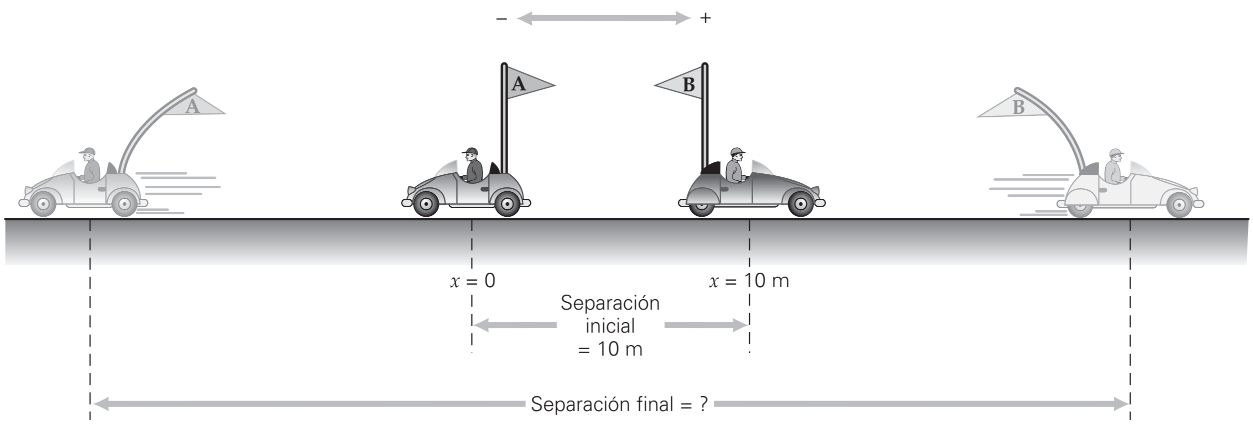
Se simplifica,

$$v = 2v \qquad \text{o} \qquad 1 = 2!$$

¿Qué está incorrecto aquí?

Razonamiento y respuesta. Evidentemente, se cometió un error grave y tiene que ver con el procedimiento de la resolución de problemas de la sección 1.7. El paso 4 dice: *Determine qué principios y ecuaciones se aplican a esta situación.* Puesto que sólo se utilizaron ecuaciones, una de ellas no debe aplicarse a esta situación. Al hacer una revisión y analizar, esto resulta ser $x = vt$, que se aplica sólo al movimiento no acelerado y, por lo tanto, no se aplica a este problema.

Ejercicio de refuerzo. Si sólo se conocen v_o y t, ¿hay alguna forma de encontrar v utilizando las ecuaciones cinemáticas dadas? Explique su respuesta. (*Las respuestas a todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.*)



▲ **FIGURA 2.11** ¡Allá van! Dos carritos aceleran en direcciones opuestas. ¿Qué separación tienen en un momento posterior? Véase el ejemplo 2.7.

Ejemplo 2.7 ■ Separación: ¿dónde están ahora?

Dos pilotos de carritos están separados por 10 m en una pista larga y recta, mirando en direcciones opuestas. Ambos parten al mismo tiempo y aceleran con una tasa constante de 2.0 m/s^2. *a*) ¿Qué separación tendrán los carritos luego de 3.0 s?

Razonamiento. Sólo sabemos que los carritos tienen una separación inicial de 10 m, de manera que podemos colocarlos en cualquier punto del eje x. Es conveniente colocar uno en el origen para que una posición inicial (x_o) sea cero. En la ▲figura 2.11 se muestra un diagrama de la situación.

Solución. El diagrama nos indica que tenemos los siguientes datos:

Dado: $x_{o_A} = 0$ ***Encuentre:*** la separación en $t = 3.0$ s

$a_A = -2.0\ \text{m/s}^2$

$t = 3.0$ s

$x_{o_B} = 10$ m

$a_B = 2.0\ \text{m/s}^2$

El desplazamiento que cada vehículo recorre está dada por la ecuación 2.11 [la única ecuación de desplazamiento (Δx) que incluye la aceleración (a)]: $x = x_o + v_o t + \frac{1}{2}at^2$. Pero espere: v_o no está en la lista Dado. Quizá pasamos por alto algún dato implícito. De inmediato nos damos cuenta de que $v_o = 0$ para ambos vehículos, así que

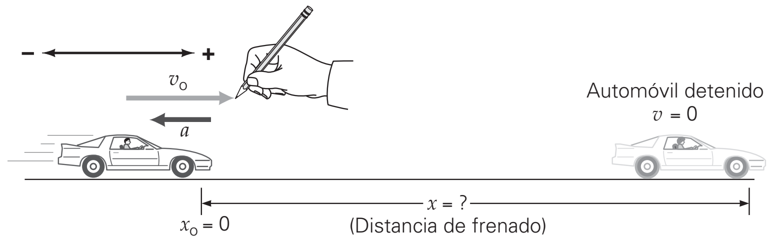
$$\begin{aligned} x_A &= x_{o_A} + v_{o_A}t + \tfrac{1}{2}a_A t^2 \\ &= 0 + 0 + \tfrac{1}{2}(-2.0\ \text{m/s}^2)(3.0\ \text{s})^2 = -9\ \text{m} \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} x_B &= x_{o_B} + v_{o_B}t + \tfrac{1}{2}a_B t^2 \\ &= 10\ \text{m} + 0 + \tfrac{1}{2}(2.0\ \text{m/s}^2)(3.0\ \text{s})^2 = 19\ \text{m} \end{aligned}$$

Entonces, el vehículo A está 9 m a la izquierda del origen sobre el eje $-x$, mientras que el vehículo B está en una posición de 19 m a la derecha sobre el eje $+x$. Por lo tanto, la separación entre los dos carritos es de 28 m.

Ejercicio de refuerzo. ¿Sería diferente la separación si hubiéramos tomado la posición inicial del vehículo B como el origen, en vez de la del vehículo A? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)



▲ **FIGURA 2.12 Distancia en que para un vehículo** Dibujo para visualizar la situación del ejemplo 2.8.

Ejemplo 2.8 ■ Frenado: distancia en que un vehículo para

La distancia de frenado de un vehículo es un factor importante para la seguridad en los caminos. Esta distancia depende de la velocidad inicial (v_o) y de la capacidad de frenado que produce la desaceleración, a, que suponemos constante. (En este caso, el signo de la aceleración es negativo, ya que es opuesto al de la velocidad, que suponemos positivo. Así pues, el vehículo disminuye su velocidad hasta parar.) Exprese la distancia de frenado x en términos de estas cantidades.

Razonamiento. Una vez más, necesitamos una ecuación de cinemática, y una lista de lo que se da y lo que se pide indica cuál es la apropiada. Se nos pide una distancia x, y no interviene el tiempo.

Solución. Estamos trabajando con variables, así que sólo podemos representar las cantidades en forma simbólica.

Dado: v_o (dirección positiva x)
a (< 0, dirección opuesta de v_o)
$v = 0$ (el automóvil se detiene)
$x_o = 0$ (el origen es la posición inicial del automóvil)

Encuentre: distancia de frenado x (en términos de las variables dadas)

Aquí también ayuda diagramar la situación, sobre todo porque intervienen cantidades vectoriales (▲figura 2.12). Dado que la ecuación 2.12 tiene las variables que queremos, nos deberá permitir encontrar la distancia de frenado x. Si expresamos la aceleración negativa explícitamente ($-a$) y suponemos $x_o = 0$, tendremos

$$v^2 = v_o^2 - 2ax$$

Puesto que el vehículo se para ($v = 0$), podemos despejar x:

$$x = \frac{v_o^2}{2a}$$

Esta ecuación da x en términos de la rapidez inicial del vehículo y la aceleración de frenado. Observemos que la distancia de frenado x es proporcional al cuadrado de la rapidez inicial. Por lo tanto, si la rapidez inicial es el doble, la distancia de frenado aumentará en un factor de 4 (con la misma desaceleración). Es decir, si la distancia de desaceleración es x_1 con una rapidez inicial de v_1, con un aumento del doble en la rapidez inicial ($v_2 = 2v_1$) la distancia de frenado aumentará cuatro veces:

$$x_1 = \frac{v_1^2}{2a}$$

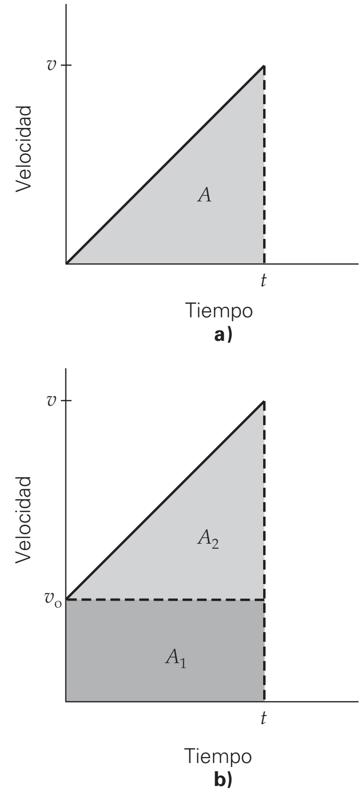
$$x_2 = \frac{v_2^2}{2a} = \frac{(2v_1)^2}{2a} = 4\left(\frac{v_1^2}{2a}\right) = 4x_1$$

Podemos obtener el mismo resultado usando cocientes:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{v_2^2}{v_1^2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 = 2^2 = 4$$

¿Será importante esta consideración para fijar límites de rapidez, digamos, en zonas escolares? (También habría que considerar el tiempo de reacción del conductor. En la sección 2.5 se da un método para aproximar el tiempo de reacción de una persona.)

Ejercicio de refuerzo. Las pruebas han demostrado que el Chevy Blazer tiene una desaceleración de frenado media de 7.5 m/s^2; en tanto que la de un Toyota Célica es de 9.2 m/s^2. Suponga que dos de estos vehículos se están conduciendo por un camino recto y plano a 97 km/h (60 mi/h), con el Célica adelante del Blazer. Un gato se cruza en el camino frente a ellos, y ambos conductores aplican los frenos al mismo tiempo y se detienen sin percance (sin arrollar ni golpear al gato). Suponiendo que ambos conductores tienen aceleración constante y el mismo tiempo de reacción, ¿a qué distancia mínima debe ir el Blazer del Célica para que no choque con éste cuando los dos vehículos se detienen? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)



▲ **FIGURA 2.13 Gráficas de *v* contra *t*, otra vez** ***a)*** En la recta de aceleración constante, el área bajo la curva es igual a x, la distancia recorrida. ***b)*** Aunque v_o no sea cero, la distancia está dada por el área bajo la curva, que se dividió en dos partes, las áreas A_1 y A_2.

Análisis gráfico de ecuaciones de cinemática

Como se mostró en la figura 2.10, las gráficas de v contra t dan una línea recta cuya pendiente son los valores de la aceleración constante. Las gráficas de v contra t tienen otro aspecto interesante. Consideremos la que se muestra en la ▸figura 2.13a, en especial el área sombrada bajo la curva. Suponga que calculamos el área del triángulo sombreado donde, en general, $A = \frac{1}{2}ab\left[\text{Área} = \frac{1}{2}(\text{altitud})(\text{base})\right]$.

En la gráfica de la figura 2.13a, la altura es v y la base es t, así que $A = \frac{1}{2}vt$. Por la ecuación $v = v_o + at$, tenemos $v = at$, donde $v_o = 0$ (la intersección). Por lo tanto,

$$A = \tfrac{1}{2}vt = \tfrac{1}{2}(at)t = \tfrac{1}{2}at^2 = \Delta x$$

Entonces, Δx, el desplazamiento, es igual al área bajo una curva de v contra t.

Examinemos ahora la figura 2.13b. Aquí, v_o tiene un valor distinto de cero en $t = 0$, o sea que el objeto ya se está moviendo. Consideremos las dos áreas sombreadas. Sabemos que el área del triángulo es $A_2 = \frac{1}{2}at^2$, y el área del rectángulo es (con $x_o = 0$) $A_1 = v_o t$. Si sumamos estas áreas para obtener el área total, tenemos

$$A_1 + A_2 = v_o t + \tfrac{1}{2}at^2 = \Delta x$$

Es tan sólo la ecuación 2.11, que es igual al área bajo la curva de v contra t.

2.5 Caída libre

OBJETIVO: Usar las ecuaciones de cinemática para analizar la caída libre.

Uno de los casos más comunes de aceleración constante es la aceleración debida a la gravedad cerca de la superficie terrestre. Cuando dejamos caer un objeto, su velocidad inicial (en el momento en que se suelta) es cero. En un momento posterior, mientras cae, tiene una velocidad distinta de cero. Hubo un cambio en la velocidad y, por lo tanto, por definición hubo una aceleración. Esta **aceleración debida a la gravedad (*g*)** cerca de la superficie terrestre tiene una magnitud aproximada de

$$g = 9.80\ \text{m/s}^2 \qquad \textit{(aceleración debida a la gravedad)}$$

(o 980 cm/s^2) y está dirigida hacia abajo (hacia el centro de la Tierra). En unidades inglesas, el valor de g es de aproximadamente 32.2 ft/s^2.

Los valores que damos aquí para g son aproximados porque la aceleración debida a la gravedad varía un poco en los diferentes lugares, como resultado de diferencias en la altura sobre el nivel del mar y en la densidad media regional de masa de la Tierra. En este libro ignoraremos esas pequeñas variaciones, a menos que se indique lo contrario. (La gravedad se estudia con mayor detalle en el capítulo 7.) La resistencia del aire es otro factor que afecta (reduce) la aceleración de un objeto que cae; pero también la ignoraremos aquí por sencillez. (Consideraremos el efecto de fricción de la resistencia del aire en el capítulo 4.)

Decimos que los objetos que se mueven únicamente bajo la influencia de la gravedad están en **caída libre**. Las palabras "caída libre" nos hacen imaginar objetos que se dejan caer. No obstante, el término se puede aplicar en general a cualquier movimiento vertical bajo la influencia exclusiva de la gravedad. Los objetos que se sueltan desde el reposo

Exploración 2.8 Determine el área bajo a(t) y v(t)

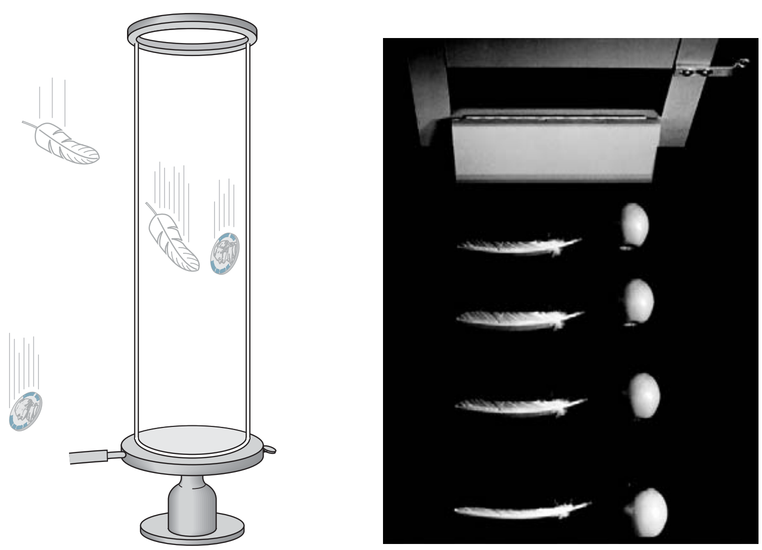
o que se lanzan hacia arriba o hacia abajo están en caída libre una vez que se sueltan. Es decir, después de $t = 0$ (el momento del lanzamiento), sólo la gravedad influye en el movimiento. (Incluso cuando un objeto proyectado hacia arriba está ascendiendo, *está acelerando hacia abajo*.) Por lo tanto, podemos usar el conjunto de ecuaciones para movimiento en una dimensión con aceleración constante, para describir la caída libre.

La aceleración debida a la gravedad, g, tiene el mismo valor de todos los objetos en caída libre, sin importar su masa ni su peso. Antes se pensaba que los cuerpos más pesados caían más rápido que los más ligeros. Este concepto formó parte de la teoría del movimiento de Aristóteles. Es fácil observar que una moneda cae más rápidamente que una hoja de papel cuando se dejan caer simultáneamente desde la misma altura. Sin embargo, en este caso la resistencia del aire es muy importante. Si el papel se arruga hasta formar una bolita compacta, dará más batalla a la moneda. Asimismo, una pluma "flota" hacia abajo mucho más lentamente que una moneda que cae. No obstante, en un vacío aproximado, donde la resistencia del aire es insignificante, la pluma y la moneda caerán con la misma aceleración: la aceleración debida a la gravedad (▼figura 2.14).

El astronauta David Scott realizó un experimento similar en la Luna en 1971, al dejar caer simultáneamente una pluma y un martillo desde la misma altura. No necesitó una bomba de vacío: la Luna no tiene atmósfera y por consiguiente no hay resistencia del aire. El martillo y la pluma llegaron a la superficie lunar juntos; pero ambos cayeron más lentamente que en la Tierra. La aceleración debida a la gravedad cerca de la superficie lunar es aproximadamente la sexta parte de la que tenemos cerca de la superficie terrestre ($g_M \approx g/6$).

Las ideas que gozan actualmente de aceptación en cuanto al movimiento de cuerpos que caen se deben en gran medida a Galileo, quien desafió la teoría de Aristóteles e investigó experimentalmente el movimiento de tales objetos. Según la leyenda, Galileo estudió la aceleración de cuerpos que caen dejando caer objetos de diferente peso desde lo alto de la Torre Inclinada de Pisa. (Véase la sección "A fondo" sobre Galileo.)

▼ **FIGURA 2.14 Caída libre y resistencia del aire** ***a)*** Cuando se dejan caer simultáneamente de la misma altura, una pluma cae más lentamente que una moneda, a causa de la resistencia del aire. En cambio, cuando ambos objetos se dejan caer en un recipiente donde se hizo un buen vacío parcial, en el que la resistencia del aire es insignificante, la pluma y la moneda caen juntas con la misma aceleración constante. ***b)*** Demostración real con imagen de destello múltiple: una manzana y una pluma se sueltan simultáneamente a través de una escotilla en una cámara de vacío grande, y caen juntas… o casi. Puesto que el vacío es sólo parcial, todavía hay cierta resistencia del aire. (¿Qué piensa usted?)



a) **b)**

A FONDO 2.1 GALILEO GALILEI Y LA TORRE INCLINADA DE PISA

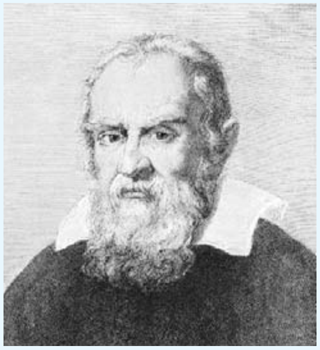


FIGURA 1 Galileo Se dice que Galileo realizó experimentos de caída libre dejando caer objetos desde la Torre Inclinada de Pisa.

FIGURA 2 La Torre Inclinada de Pisa Construida como campanario para una catedral cercana, se edificó sobre un subsuelo inestable. Su construcción se inició en 1173, y comenzó a tenderse hacia un lado y luego hacia el otro, antes de inclinarse en su dirección actual. Hoy día, la torre diverge unos 5 m (16 ft) de la vertical en su parte superior. Se cerró en 1990 y se hizo un intento por estabilizarla y corregir la inclinación. Luego de cierta mejoría en la torre se abrió nuevamente al público.

Galileo Galilei (▲figura 1) nació en Pisa, Italia, en 1564 durante el Renacimiento. En la actualidad se le conoce en todo el mundo por su nombre de pila y muchos lo consideran el padre de la ciencia moderna y la física experimental, lo cual avala la magnitud de sus aportaciones científicas.

Una de las mayores contribuciones de Galileo a la ciencia fue el establecimiento del método científico, es decir, la investigación por experimentación. En cambio, el enfoque de Aristóteles se basaba en la deducción lógica. En el método científico, para que una teoría sea válida, debe predecir o coincidir correctamente con resultados experimentales. Si no es así, o no es válida o debe modificarse. Galileo señalaba: "Creo que en el estudio de problemas naturales no debemos partir de la autoridad de lugares de las Escrituras, sino de experimentos razonables y de demostraciones necesarias".*

Tal vez la leyenda más popular y conocida acerca de Galileo sea que realizó experimentos dejando caer objetos desde la Torre Inclinada de Pisa (▸figura 2). Se ha puesto en duda que Galileo lo haya hecho realmente, pero de lo que no hay duda es de que cuestionó la perspectiva de Aristóteles respecto al movimiento de cuerpos que caen. En 1638, Galileo escribió:

> Aristóteles dice que una esfera de hierro de cien libras que cae de una altura de cien codos llega al suelo antes que una esfera de una libra haya caído un solo cúbito. Yo digo que llegan al mismo tiempo. Al realizar el experimento, constatamos que la más grande rebasa a la más pequeña por el espesor de dos dedos; es decir, cuando la mayor ha llegado al suelo, la otra está a dos grosores de dedo del suelo; no creo que tras esos dos dedos podamos ocultar los noventa y nueve cúbitos de Aristóteles.†

Éste y otros escritos revelan que Galileo conocía el efecto de la resistencia del aire.

Los experimentos en la Torre de Pisa supuestamente se efectuaron alrededor de 1590. En sus escritos de esa época, Galileo dice haber dejado caer objetos desde una torre alta, aunque nunca menciona específicamente la Torre de Pisa. Una carta que otro científico escribió a Galileo en 1641 describe la acción de dejar caer una bala de cañón y una de mosquete desde la Torre de Pisa. El primer relato que menciona un experimento similar de Galileo lo escribió Vincenzo Viviani, su último discípulo y primer biógrafo, doce años después de su muerte. No se sabe si Galileo se lo contó a Viviani en sus años postreros o si Viviani creó esta imagen de su antiguo maestro.

Lo importante es que Galileo reconoció (y probablemente demostró experimentalmente) que los objetos en caída libre caen con la misma aceleración, sea cual fuere su masa o peso. (Véase la figura 2.14.) Galileo no explicó por qué todos los objetos en caída libre tienen la misma aceleración; pero Newton sí lo hizo, como veremos en un capítulo posterior.

*De *Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution & Inheritance*, por F. Meyr (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1982).

†De *Aristotle Galileo and the Tower of Pisa*, por L. Cooper(Ithaca, NY: Cornell University Press, 1935).

Se acostumbra usar y para representar la dirección vertical y considerar positivo hacia arriba (como en el eje y vertical de las coordenadas cartesianas). Como la aceleración debida a la gravedad siempre es hacia abajo, está en la dirección y negativa. Esta aceleración negativa, $a = -g = -9.80 \text{ m/s}^2$, se sustituye en las ecuaciones de movimiento; sin embargo, la relación $a = -g$ se puede expresar explícitamente en las ecuaciones de movimiento rectilíneo, por conveniencia:

$$v = v_o - gt \tag{2.8'}$$

$$y = y_o + v_o t - \tfrac{1}{2}gt^2 \tag{2.11'}$$

(*Ecuaciones de caída libre con* $a_y = -g$ *expresada explícitamente*)

$$v^2 = v_o^2 - 2g(y - y_o) \tag{2.12'}$$

Ilustración 2.6 Caída libre

La ecuación 2.10 también es válida, pero no contiene a g:

$$y = y_o + \tfrac{1}{2}(v + v_o)t \tag{2.10'}$$

Por lo regular se toma el origen ($y = 0$) del marco de referencia como la posición inicial del objeto. El hecho de escribir explícitamente $-g$ en las ecuaciones nos recuerda su dirección.

Las ecuaciones se pueden escribir con $a = g$; por ejemplo, $v = v_o + gt$, asociando el signo menos directamente a g. En este caso, siempre sustituiremos -9.80 m/s^2 por g. No obstante, cualquier método funciona y la *decisión es arbitraria*. Quizá su profesor prefiera uno u otro método.

Note que siempre debemos indicar explícitamente las direcciones de las cantidades vectoriales. La posición y y las velocidades v y v_o podrían ser positivas (hacia arriba) o negativas (hacia abajo); pero la aceleración debida a la gravedad siempre es hacia abajo.

El empleo de estas ecuaciones y la convención del signo (con $-g$ explícitamente expresado en las ecuaciones) se ilustran en los ejemplos que siguen. (Esta convención se usará durante todo el texto.)

Ejemplo 2.9 ■ Piedra lanzada hacia abajo: repaso de ecuaciones de cinemática

Un niño parado sobre un puente lanza una piedra verticalmente hacia abajo con una velocidad inicial de 14.7 m/s, hacia el río que pasa por abajo. Si la piedra choca contra el agua 2.00 s después, ¿a qué altura está el puente sobre el agua?

Razonamiento. Es un problema de caída libre, pero hay que observar que la velocidad inicial es hacia abajo, o negativa. Es importante expresar de manera explícita este hecho. Dibuje un diagrama para que le ayude a analizar la situación, si lo considera necesario.

Solución. Como siempre, primero escribimos lo que nos dan y lo que nos piden:

Dado: $v_o = -14.7$ m/s (se toma hacia abajo como dirección negativa)
$t = 2.00$ s
g $(= 9.80 \text{ m/s}^2)$

Encuentre: y (altura del puente sobre el agua)

Observe que g se toma como número positivo, porque en nuestra convención el signo menos direccional ya se incluyó en las anteriores ecuaciones de movimiento.

¿Qué ecuación(es) dará(n) la solución con los datos proporcionados? Debería ser evidente que la distancia que la piedra recorre en un tiempo t está dada directamente por la ecuación 2.11′. Tomando $y_o = 0$:

$$\begin{aligned} y &= v_o t - \tfrac{1}{2}gt^2 = (-14.7 \text{ m/s})(2.00 \text{ s}) - \tfrac{1}{2}(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ s})^2 \\ &= -29.4 \text{ m} - 19.6 \text{ m} = -49.0 \text{ m} \end{aligned}$$

El signo menos indica que el desplazamiento es hacia abajo. Así pues, la altura del puente es 49.0 m.

Ejercicio de refuerzo. ¿Cuánto más tardaría la piedra de este ejemplo en tocar el agua, si el niño la hubiera dejado caer en vez de lanzarla? (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

El *tiempo de reacción* es el tiempo que un individuo necesita para notar, pensar y actuar en respuesta a una situación; por ejemplo, el tiempo que transcurre entre que se observa por primera vez una obstrucción en el camino cuando se conduce un automóvil, y se responde a ella aplicando los frenos. El tiempo de reacción varía con la complejidad de la situación (y con el individuo). En general, la mayoría del tiempo de reacción de una persona se dedica a pensar, pero la práctica en el manejo de una situación dada puede reducir ese tiempo. El siguiente ejemplo explica un método para medir el tiempo de reacción.

▲ **FIGURA 2.15 Tiempo de reacción** El tiempo de reacción de una persona puede medirse pidiéndole que sujete una regla que se deja caer. Véase el ejemplo 2.10.

Ejemplo 2.10 ■ Medición del tiempo de reacción: caída libre

El tiempo de reacción de una persona puede medirse pidiendo a otra persona que deje caer una regla (sin previo aviso), cuya base está a la altura del pulgar y el índice de la primera persona, y entre ellos, como se muestra en la ▸figura 2.15. La primera persona sujeta lo antes posible la regla que cae, y se toma nota de la longitud de la regla que queda por debajo del dedo superior. Si la regla desciende 18.0 cm antes de ser atrapada, ¿qué tiempo de reacción tiene la persona?

Razonamiento. Intervienen tanto la distancia como el tiempo. Esta observación indica la ecuación de cinemática que debería usarse.

Solución. Observamos que sólo se da la distancia de caída. Sin embargo, sabemos algunas cosas más, como v_o y g, así que, tomando $y_o = 0$:

Dado: $y = -18.0\text{ cm} = -0.180\text{ m}$ ***Encuentre:*** t (tiempo de reacción)
$v_o = 0$
$g\ (= 9.80\text{ m/s}^2)$

(Observe que la distancia y se convirtió en metros. ¿Por qué?) Vemos que la ecuación pertinente es la 2.11′ (con $v_o = 0$), que da

$$y = -\tfrac{1}{2}gt^2$$

Despejando t,

$$t = \sqrt{\frac{2y}{-g}} = \sqrt{\frac{2(-0.180\text{ m})}{-9.80\text{ m/s}^2}} = 0.192\text{ s}$$

Pruebe este experimento con un compañero y mida su tiempo de reacción. ¿Por qué cree que debe ser otra persona la que deje caer la regla?

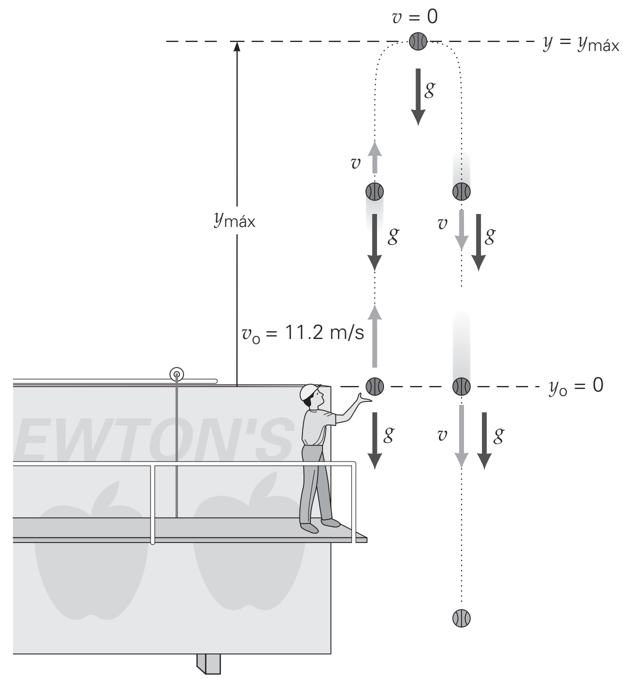
Ejercicio de refuerzo. Un truco popular consiste en usar un billete nuevo de dólar en vez de la regla de la figura 2.15, y decir a la persona que puede quedarse con el billete si lo puede atrapar. ¿Es buen negocio la propuesta? (La longitud de un billete de dólar es de 15.7 cm.) (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Ejemplo 2.11 ■ Caída libre hacia arriba y hacia abajo: uso de datos implícitos

Un trabajador que está parado en un andamio junto a una valla lanza una pelota verticalmente hacia arriba. La pelota tiene una velocidad inicial de 11.2 m/s cuando sale de la mano del trabajador en la parte más alta de la valla (▾figura 2.16). *a*) ¿Qué altura máxima alcanza la pelota sobre la valla? *b*) ¿Cuánto tarda en llegar a esa altura? *c*) ¿Dónde estará la pelota en $t = 2.00$ s?

Razonamiento. En el inciso *a*), sólo hay que considerar la parte ascendente del movimiento. Note que la pelota se detiene (velocidad instantánea cero) en la altura máxima, lo cual nos permite determinar esa altura. *b*) Conociendo la altura máxima, podemos determinar el tiempo de ascenso. En *c*), la ecuación distancia-tiempo (ecuación 2.11′) es válida para cualquier tiempo y da la posición (y) de la pelota relativa al punto de lanzamiento en $t = 2.00$ s.

(*continúa en la siguiente página*)



▲ **FIGURA 2.16 Caída libre hacia arriba y hacia abajo** Observe la longitud de los vectores de velocidad y aceleración en diferentes tiempos. (Las trayectorias ascendente y descendente de la pelota se desplazaron horizontalmente para tener una mejor ilustración.) Véase el ejemplo 2.11.

Solución. Parecería que lo único que se da en el problema general es la velocidad inicial v_o en el tiempo t_o. Sin embargo, se sobreentiende un par de datos más. Uno, desde luego, es la aceleración g, y el otro es la velocidad en la altura máxima, donde la pelota se detiene. Aquí, al cambiar de dirección, la velocidad de la pelota es momentáneamente cero, así que tenemos (tomando otra vez $y_o = 0$):

Dado: $v_o = 11.2$ m/s	***Encuentre:*** *a*) $y_{máx}$ (altura máxima por arriba del punto de lanzamiento)
g $(= 9.80$ m/s$^2)$	*b*) t_a (tiempo de ascenso)
$v = 0$ (en $y_{máx}$)	*c*) y (en $t = 2.00$ s)
$t = 2.00$ s [para el inciso *c*]	

***a*)** Nos referimos a la altura de la parte más alta de la valla ($y_o = 0$). En esta parte del problema sólo nos ocupamos del movimiento ascendente: se lanza una pelota hacia arriba y se detiene en su altura máxima $y_{máx}$. Con $v = 0$ a esta altura, podemos obtener $y_{máx}$ directamente de la ecuación 2.12′:

$$v^2 = 0 = v_o^2 - 2gy_{max}$$

Así que,

$$y_{máx} = \frac{v_o^2}{2g} = \frac{(11.2 \text{ m/s})^2}{2(9.80 \text{ m/s}^2)} = 6.40 \text{ m}$$

relativa al borde superior de la valla ($y_o = 0$; véase la figura 2.16).

***b*)** Sea t_a el tiempo en que la pelota sube a su altura máxima. Éste es el tiempo que la pelota tarda en alcanzar $y_{máx}$, donde $v = 0$. Puesto que conocemos v_o y v, obtenemos el tiempo t_a directamente de la ecuación 2.8′:

$$v = 0 = v_o - gt_a$$

Entonces,

$$t_a = \frac{v_o}{g} = \frac{11.2 \text{ m/s}}{9.80 \text{ m/s}^2} = 1.14 \text{ s}$$

c) La altura de la pelota en $t = 2.00$ s está dada directamente por la ecuación 2.11′:

$$\begin{aligned} y &= v_o t - \tfrac{1}{2}gt^2 \\ &= (11.2\text{ m/s})(2.00\text{ s}) - \tfrac{1}{2}(9.80\text{ m/s}^2)(2.00\text{ s})^2 = 22.4\text{ m} - 19.6\text{ m} = 2.8\text{ m} \end{aligned}$$

Observe que esta altura de 2.8 m se mide hacia arriba desde el punto de referencia ($y_o = 0$). La pelota alcanzó su altura máxima y empieza su descenso.

Considerada desde otro punto de referencia, la situación del inciso *c* se analiza como si se dejara caer una pelota desde una altura de $y_{\text{máx}}$ sobre la parte superior de la valla con $v_o = 0$, y preguntando qué distancia cae en un tiempo $t = 2.00\text{ s} - t_a$ $2.00\text{ s} - 1.14\text{ s} = 0.86$ s. La respuesta es (con $y_o = 0$ en la altura máxima):

$$y = v_o t - \tfrac{1}{2}gt^2 = 0 - \tfrac{1}{2}(9.80\text{ m/s}^2)(0.86\text{ s})^2 = -3.6\text{ m}$$

Esta altura es la misma que la posición que obtuvimos antes, sólo que se mide con respecto a la altura máxima como punto de referencia; es decir,

$$y_{\text{máx}} - 3.6\text{ m} = 6.4\text{ m} - 3.6\text{ m} = 2.8\text{ m}$$

arriba del punto de inicio.

Ejercicio de refuerzo. ¿A qué altura la pelota de este ejemplo tiene una rapidez de 5.00 m/s? (*Sugerencia:* la pelota alcanza esta altura dos veces, una de subida y otra de bajada.) (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Veamos un par de hechos interesantes relacionados con el movimiento en caída libre de un objeto lanzado hacia arriba en ausencia de resistencia del aire. Primero, si el objeto regresa a su elevación de lanzamiento, entonces los tiempos de ascenso y descenso son iguales. Asimismo, en la cúspide de la trayectoria, la velocidad del objeto es cero durante un instante, pero la aceleración se mantiene, incluso ahí, en el valor constante de 9.8 m/s^2 hacia abajo. Si la aceleración se volviera cero, el objeto permanecería ahí, ¡como si la gravedad habría dejado de actuar!

Por último, el objeto regresa a su punto de origen con la misma rapidez con la que fue lanzado. (Las velocidades tienen la misma magnitud, pero tienen diferente dirección.)

Sugerencia para resolver problemas

Al resolver problemas de proyección vertical en que intervienen movimientos ascendentes y descendentes, a menudo se recomienda dividir el problema en dos partes y considerarlas por separado. Como vimos en el ejemplo 2.11, en la parte ascendente del movimiento la velocidad es cero en la altura máxima. Por lo general una cantidad de cero simplifica los cálculos. Asimismo, la parte descendente del movimiento es análoga a la de un objeto que se deja caer desde la altura máxima, donde la velocidad inicial cero.

No obstante, como muestra el ejemplo 2.11, podemos usar directamente las ecuaciones adecuadas para cualquier posición o tiempo del movimiento. Por ejemplo, en el inciso *c* notamos que la altura se obtuvo directamente para un tiempo *después* de que la pelota había alcanzado la altura máxima. También podríamos haber calculado directamente la velocidad de la pelota con la ecuación 2.8′, $v = vo - gt$.

También observe que la posición inicial siempre se tomó como $y_o = 0$. Este supuesto generalmente es válido y se acepta por conveniencia cuando en la situación sólo interviene un objeto (entonces, $y_o = 0$ en $t_o = 0$). Esta convención puede ahorrar mucho tiempo al plantear y resolver ecuaciones.

Lo mismo es válido con un solo objeto en movimiento horizontal: generalmente podemos tomar $x_o = 0$ en $t_o = 0$. Sin embargo, en este caso hay un par de excepciones: primera, si el problema especifica que el objeto está situado inicialmente en una posición distinta de $x_o = 0$; segunda, si en el problema intervienen dos objetos, como en el ejemplo 2.7. En este caso, si consideramos que un objeto inicialmente está en el origen, la posición inicial del otro no será cero.

Exploración 2.7 *Caída de dos pelotas; una con caída retardada*

Exploración 2.6 *Lance una pelota de manera que casi toque el techo*

Ejemplo 2.12 ■ Caída libre en Marte

El Mars Polar Lander se lanzó en enero de 1999 y se perdió cerca de la superficie marciana en diciembre de 1999. No se sabe qué pasó con esa nave espacial. (Véase la sección "A fondo" del capítulo 1 acerca de la importancia de la conversión de unidades.) Supongamos que se dispararon los retro-cohetes y luego se apagaron, y que la nave se detuvo para después caer hasta la superficie desde una altura de 40 m. (Muy improbable, pero supongamos que así fue.) Considerando que la nave está en caída libre, ¿con qué velocidad hizo impacto con la superficie?

Razonamiento. Esto parece análogo a un problema sencillo de dejar caer un objeto desde una altura. Y lo es, sólo que sucede en Marte. Ya vimos en esta sección que la aceleración debida a la gravedad en la superficie de la Luna es la sexta parte de la que tenemos en la Tierra. La aceleración debida a la gravedad también varía en otros planetas, así que necesitamos conocer g_{Marte}. Busque en el apéndice III. (Los apéndices contienen mucha información útil, así que no hay que olvidarse de revisarlos.)

Solución.

Dado:
$$y = -40 \text{ m } (y_o = 0 \text{ otra vez})$$
$$v_o = 0$$
$$g_{\text{Marte}} = (0.379)g = (0.379)(9.8 \text{ m/s}^2) = 3.7 \text{ m/s}^2 \text{ (del apéndice III)}$$

Encuentre: v (magnitud, rapidez)

Por lo que utilizamos la ecuación 2.12′:

$$v^2 = v_o^2 - 2g_{\text{Marte}}y = 0 - 2(3.7 \text{ m/s}^2)(-40 \text{ m})$$

Entonces,

$$v^2 = 296 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad \text{y} \quad v = \sqrt{296 \text{ m}^2/\text{s}^2} = \pm 17 \text{ m/s}$$

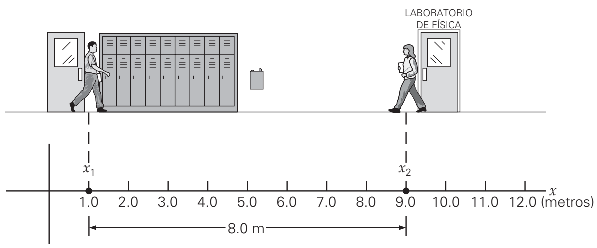
Ésta es la velocidad, que sabemos que es hacia abajo, por lo que elegimos la raíz negativa y $v = -17$ m/s. Ya que la rapidez es la magnitud de la velocidad, es 17 m/s.

Ejercicio de refuerzo. Desde la altura de 40 m, ¿cuánto tardó el descenso del Lander? Calcúlelo empleando dos ecuaciones de cinemática distintas, y compare las respuestas. (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Repaso del capítulo

- El **movimiento** implica un cambio de posición; se puede describir en términos de la distancia recorrida (un escalar) o del desplazamiento (un vector).

- Una cantidad escalar sólo tiene magnitud (valor y unidades); una cantidad vectorial tiene magnitud y dirección.



- La **rapidez media** $\bar{s}$ (un escalar) es la distancia recorrida dividida entre el tiempo:

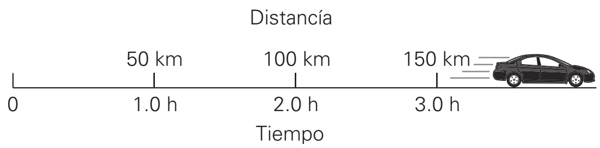
$$\text{rapidez media} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo total de recorrido}}$$

$$\bar{s} = \frac{d}{\Delta t} = \frac{d}{t_2 - t_1} \tag{2.1}$$

- La **velocidad media** (un vector) es el desplazamiento dividido entre el tiempo total de recorrido:

$$\text{velocidad media} = \frac{\text{desplazamiento}}{\text{tiempo total de recorrido}}$$

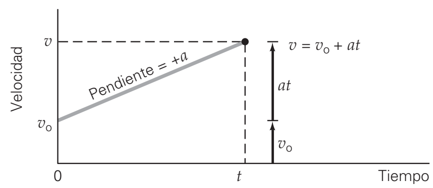
$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad \text{o} \quad x = x_o + \bar{v}t \tag{2.3}$$



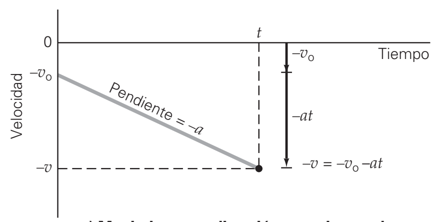
- La **velocidad instantánea** (un vector) describe con qué rapidez y en qué dirección se está moviendo algo en un instante dado.
- La **aceleración** es la tasa de cambio de la velocidad con el tiempo, así que es una cantidad vectorial:

$$\text{aceleración media} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{tiempo que tarda el cambio}}$$

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \tag{2.5}$$



a) **Movimiento en dirección positiva: acelera**



c) **Movimiento en dirección negativa: acelera**

- Las **ecuaciones de cinemática para aceleración *constante***:

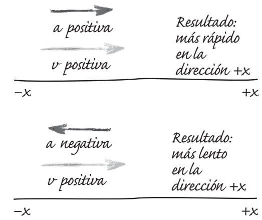
$$\bar{v} = \frac{v + v_o}{2} \tag{2.9}$$

$$v = v_o + at \tag{2.8}$$

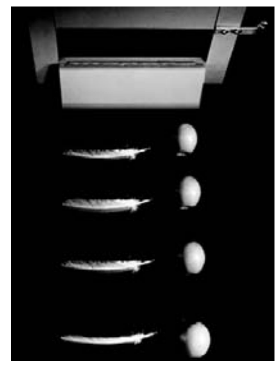
$$x = x_o + \tfrac{1}{2}(v + v_o)t \tag{2.10}$$

$$x = x_o + v_o t + \tfrac{1}{2}at^2 \tag{2.11}$$

$$v^2 = v_o^2 + 2a(x - x_o) \tag{2.12}$$



- Un objeto en **caída libre** tiene una aceleración constante de magnitud $g = 9.80\ \text{m/s}^2$ (aceleración debida a la gravedad) cerca de la superficie de la Tierra.



- Si expresamos $a = -g$ en las ecuaciones de cinemática para aceleración constante en la dirección y tenemos lo siguiente:

$$v = v_o - gt \tag{2.8'}$$

$$y = y_o + \tfrac{1}{2}(v + v_o)t \tag{2.10'}$$

$$y = y_o + v_o t - \tfrac{1}{2}gt^2 \tag{2.11'}$$

$$v^2 = v_o^2 - 2g(y - y_o) \tag{2.12'}$$

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender, El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

2.1 Distancia y rapidez: cantidades escalares y 2.2 Desplazamiento unidimensional y velocidad: cantidades vectoriales

1. **OM** Una cantidad vectorial tiene *a*) sólo magnitud, *b*) sólo dirección o *c*) tanto dirección como magnitud.

2. **OM** ¿Qué se puede decir acerca de la distancia recorrida en relación con la magnitud del desplazamiento? *a*) que es mayor, *b*) que es igual, *c*) tanto *a* como *b*.

3. **OM** Una cantidad vectorial tiene *a*) sólo magnitud, *b*) sólo dirección o *c*) tanto dirección como magnitud.

4. **OM** ¿Qué se puede decir acerca de la rapidez promedio en relación con la magnitud de la velocidad promedio? *a*) que es mayor, *b*) que es igual, *c*) tanto *a* como *b*.

5. **PC** ¿El desplazamiento de una persona en un viaje puede ser cero, aunque la distancia recorrida en el viaje no sea cero? ¿Es posible la situación inversa? Explique.

6. **PC** Le dicen que una persona caminó 750 m. ¿Qué puede decir con certeza acerca de la posición final de la persona relativa al punto de partida?

7. **PC** Si el desplazamiento de un objeto es 300 m hacia el norte, ¿qué diría acerca de la distancia recorrida por ese objeto?

8. **PC** La rapidez es la magnitud de la velocidad. ¿La rapidez media es la magnitud de la velocidad media? Explique.

9. **PC** La velocidad promedio de una persona que trota en una pista recta se calcula en +5 km/h. ¿Es posible que la velocidad instantánea de esta persona sea negativa en algún momento durante el trayecto? Explique su respuesta.

10. ● ¿Qué magnitud tiene el desplazamiento de un automóvil que recorre media vuelta de una pista circular con 150 m de radio? ¿Y cuando recorre una vuelta completa?

11. ● Un estudiante lanza una piedra verticalmente hacia arriba desde su hombro, que está 1.65 m sobre el suelo. ¿Qué desplazamiento tendrá la piedra cuando caiga al suelo?

12. ● En 1999, el corredor marroquí Hicham El Guerrouj corrió la milla en 3 min, 43.13 s. ¿Qué rapidez media tuvo durante la carrera?

13. ● Una anciana camina 0.30 km en 10 min, dando la vuelta a un centro comercial. *a*) Calcule su rapidez media en m/s. *b*) Si ella quiere aumentar su rapidez media en 20% al dar una segunda vuelta, ¿en cuántos minutos deberá caminarla?

14. ●● A un paciente de hospital se le deben suministrar 500 cc de solución salina IV. Si la solución salina se suministra a una tasa de 4.0 mL/min, ¿cuánto tiempo tardará en acabarse el medio litro?

15. ●● La enfermera de un hospital camina 25 m para llegar a la habitación de un paciente, que está al final del pasillo, en 0.50 min. Habla con el paciente durante 4.0 min y luego regresa a la estación de enfermeras con la misma rapidez que a la ida. ¿Cuál fue la rapidez promedio de la enfermera?

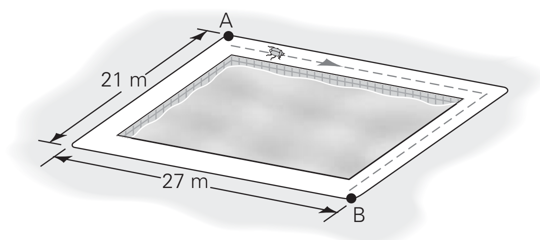
16. ●● En un viaje de campo traviesa, una pareja maneja 500 mi en 10 h el primer día, 380 mi en 8.0 h en el segundo y 600 mi en 15 h en el tercero. ¿Cuál fue la rapidez promedio para todo el viaje?

17. **EI** ●● Un automóvil recorre tres cuartas parte de una vuelta en una pista circular de radio *R*. *a*) La magnitud del desplazamiento es 1) menor que *R*, 2) mayor que *R*, pero menor que 2*R*, o 3) mayor que 2*R* *b*) Si $R = 50$ m, ¿cuál es la magnitud del desplazamiento?

18. **EI** ●● Un automóvil de carreras da una vuelta a una pista circular de 500 m de radio en 50 s. *a*) La velocidad media del auto es 1) cero, 2) 100 m/s, 3) 200 m/s o 4) ninguna de las anteriores. ¿Por qué? *b*) Calcule la rapidez media del auto?

19. **EI** ●● Un estudiante corre 30 m al este, 40 m al norte y 50 m al oeste. *a*) La magnitud del desplazamiento neto del estudiante es 1) entre 0 y 20 m, 2) entre 20 m y 40 m o 3) entre 40 m y 60 m. *b*) Calcule el desplazamiento neto?

20. ●● Un estudiante lanza una pelota verticalmente hacia arriba de modo que sube 7.1 m hasta su altura máxima. Si la pelota se atrapa en la altura inicial 2.4 s después de ser lanzada, *a*) ¿qué rapidez media tuvo?, *b*) ¿qué velocidad media tuvo?



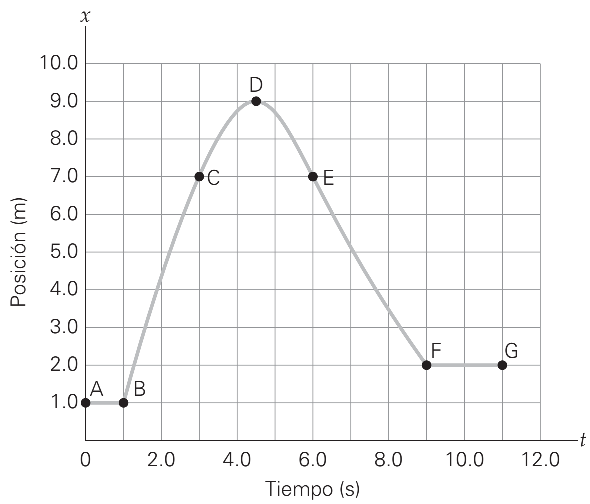
▲ **FIGURA 2.17 Rapidez contra velocidad** Véase el ejercicio 21. (No está a escala, se ha desplazado al insecto por claridad.)

21. ●● Un insecto repta por el borde de una piscina rectangular de 27 m de longitud y 21 m de anchura (▲figura 2.17). Tarda 30 min en reptar de la esquina A a la esquina B. Calcule *a*) su rapidez media y *b*) la magnitud de su velocidad media?

22. ●● Considere el movimiento sobre la superficie terrestre durante un día entero. *a*) ¿Cuál es la velocidad promedio de una persona situada en el ecuador de la Tierra? *b*) ¿Cuál es la rapidez promedio de una persona situada en el ecuador de la Tierra? *c*) Compare estos dos resultados en relación con una persona ubicada exactamente en el Polo Norte de la Tierra.

23. ●● Un pateador de futbol americano de una preparatoria hace un intento por anotar un gol de campo de 30.0 yardas y golpea el travesaño, que está a una altura de 10.0 ft. *a*)¿Cuál es el desplazamiento neto del balón desde el momento en que abandona el suelo hasta que golpea el travesaño? *b*) Suponiendo que el balón tardó 2.5 s en golpear el travesaño, ¿cuál fue su velocidad promedio? *c*) Explique por qué *no es posible* determinar su rapidez promedio a partir de estos datos.

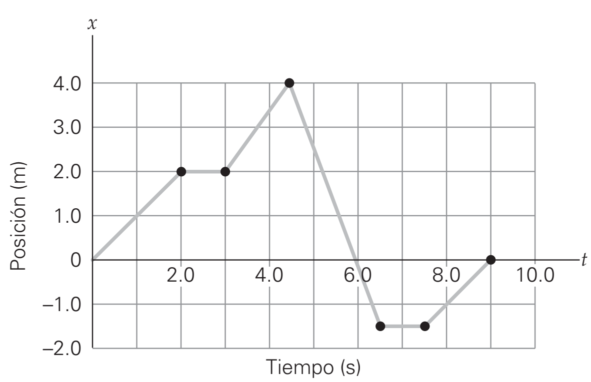
24. ●● En la ▸figura 2.18 se presenta una gráfica de posición *versus* tiempo para un objeto en movimiento rectilíneo. *a*) ¿Cuáles son las velocidades promedio para los segmentos



▲ **FIGURA 2.18 Posición contra tiempo** Véase el ejercicio 24.

AB, BC, CD, DE, EF, FG y BG? *b*) Indique si el movimiento es uniforme o no uniforme en cada caso. *c)* ¿Cuál es la velocidad instantánea en el punto D?

25. ●● Al demostrar un paso de baile, una persona se mueve en una dimensión, como se muestra en la ▼figura 2.19. Calcule *a*) la rapidez media y *b*) la velocidad media en cada fase del movimiento. *c*) Calcule la velocidad instantánea en $t = 1.0$ s, 2.5 s, 4.5 s y 6.0 s? *d*) Calcule la velocidad media para el intervalo entre $t = 4.5$ s y $t = 9.0$ s? [*Sugerencia:* recuerde que el desplazamiento total es el desplazamiento entre el punto de partida y el punto final.]



▲ **FIGURA 2.19 Posición contra tiempo** Véase el ejercicio 25.

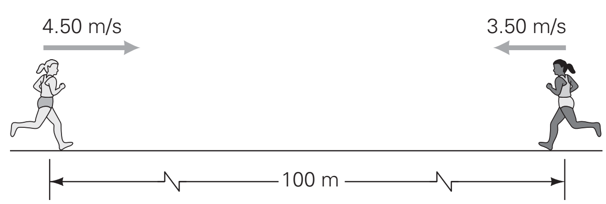
26. ●● Podemos determinar la rapidez de un automóvil midiendo el tiempo que tarda en viajar entre dos mojones de milla en una carretera. *a*) ¿Cuántos segundos deberá tardar el automóvil en viajar entre dos mojones consecutivos, si su rapidez media es de 70 mi/h? *b*) Calcule la rapidez media si el carro tarda 65 s en viajar entre los mojones de milla?

27. ●● El cabello corto crece a una tasa aproximada de 2.0 cm/mes. Un estudiante universitario se corta el cabello para dejarlo de un largo de 1.5 cm. Se cortará de nuevo el cabello cuando éste mida 3.5 cm. ¿Cuánto tiempo transcurrirá hasta su siguiente visita al peluquero?

28. ●●● Un estudiante que regresa a casa en automóvil en Navidad parte a las 8:00 A.M. para hacer el viaje de 675 km, que efectúa casi en su totalidad en autopistas interestatales no urbanas. Si quiere llegar a casa antes de las 3:00 P.M., ¿qué rapidez media deberá mantener? ¿Tendrá que exceder el límite de velocidad de 65 mi/h?

29. ●●● Un vuelo de una línea aérea regional consta de dos etapas con una escala intermedia. El avión vuela 400 km directamente hacia el norte, del aeropuerto A al aeropuerto B. A partir de aquí, vuela 300 km directamente hacia el este hasta su destino final en el aeropuerto C. *a*) ¿Cuál es el desplazamiento del avión desde su punto de partida? *b*) Si el primer tramo del trayecto se recorre en 45 min y el segundo en 30 min, ¿cuál es la velocidad promedio del viaje? *c*) ¿Cuál es la rapidez promedio del viaje? *d*) ¿Por qué la rapidez promedio no es la misma que la magnitud para la velocidad promedio?

30. ●●● Dos corredoras se aproximan entre sí, en una pista recta con rapideces constantes de 4.50 m/s y 3.50 m/s, respectivamente, cuando están separadas 100 m (▼figura 2.20). ¿Cuánto tardarán en encontrarse y en qué posición lo harán si mantienen sus rapideces?



▲ **FIGURA 2.20 ¿Cuándo y dónde se encontrarán?** Véase el ejercicio 30.

2.3 Aceleración

31. **OM** La gráfica de posición contra tiempo para un objeto que tiene aceleración constante es *a*) una línea horizontal, *b*) una línea recta no horizontal ni vertical, *c*) una línea vertical, *d*) una curva.

32. **OM** La aceleración puede ser el resultado de *a*) un incremento en la rapidez, *b*) una disminución en la rapidez, *c*) un cambio en la dirección, *d*) todas las anteriores.

33. **OM** Una aceleración negativa puede provocar *a*) un incremento en la rapidez, *b*) una disminución en la rapidez, *c*) *a* o *b*.

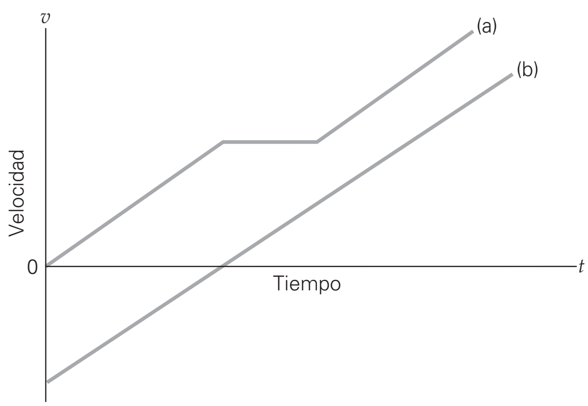
34. **OM** El pedal de la gasolina de un automóvil por lo común se conoce como *acelerador*. ¿Cuál de los siguiente también podría llamarse acelerador? *a*) Los frenos; *b*) el volante; *c*) la palanca de velocidades; *d*) los tres incisos anteriores. Explique.

35. **PC** Un automóvil viaja con una rapidez constante de 60 mi/h en una pista circular. ¿El auto está acelerando? Explique su respuesta.

36. **PC** ¿Un objeto que se mueve rápido siempre tiene una aceleración mayor que uno que se mueve más lentamente? Dé algunos ejemplos y explique.

37. **PC** Un compañero de clase afirma que la aceleración negativa siempre significa que un objeto en movimiento está desacelerando. ¿Es verdadera esta afirmación? Explique por qué.

38. **PC** Describa los movimientos de dos objetos cuya gráfica de velocidad contra tiempo se presenta en la ▼figura 2.21.



▲ **FIGURA 2.21 Descripción de movimiento**
Véase el ejercicio 38.

39. **PC** Un objeto que viaja a velocidad constante v_o experimenta una aceleración constante en la misma dirección durante un tiempo t. Luego experimenta una aceleración de igual magnitud en la dirección opuesta a v_o durante el mismo tiempo t. ¿Qué velocidad final tendrá el objeto?

40. ● Un automóvil que viaja a 15.0 km/h por un camino recto y plano acelera a 65.0 km/h en 6.00 s. Calcule la magnitud de la aceleración media del automóvil?

41. ● Un auto deportivo puede acelerar de 0 a 60 mi/h en 3.9 s. Calcule la magnitud de su aceleración media en m/s^2.

42. ● Si el automóvil del ejercicio 41 puede acelerar a $7.2\ m/s^2$, ¿cuánto tardará en acelerar de 0 a 60 mi/h?

43. **EI** ●● Un matrimonio viaja en automóvil a 40 km/h por una carretera recta. Ven un accidente en la distancia, así que el conductor aplica los frenos y en 5.0 s el vehículo baja uniformemente su velocidad hasta parar. *a*) ¿La dirección del vector de aceleración es 1. en la misma dirección, 2. en la dirección opuesta o 3. a 90º del vector de velocidad? ¿Por qué? *b*) ¿Cuánto debe cambiar la velocidad cada segundo entre el inicio del frenado y el alto total?

44. ●● Un paramédico conduce una ambulancia a una rapidez constante de 75 km/h por 10 cuadras de una calle recta. A causa del intenso tráfico, el conductor frena hasta los 30 km/h en 6 s y recorre dos cuadras más. ¿Cuál fue la aceleración promedio del vehículo?

45. ●● Con buenos neumáticos y frenos, un automóvil que viaja a 50 mi/h sobre el pavimento seco recorre 400 ft desde que el conductor reacciona ante algo que ve y hasta que detiene el vehículo. Si esta acción se realiza de manera uniforme, ¿cuál es la aceleración del automóvil? (Éstas son condiciones reales y 400 ft es aproximadamente la longitud de una cuadra de la ciudad.)

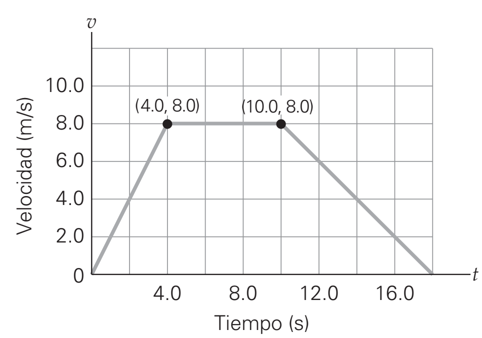
46. ●● Una persona arroja hacia arriba una pelota en línea recta con una rapidez inicial de 9.8 m/s y, al regresar a su mano, la golpea moviéndose hacia abajo con la misma rapidez. Si todo el trayecto dura 2.0 s, determine *a*) la aceleración promedio de la pelota y *b*) su velocidad promedio.

47. ●● Después del aterrizaje, un avión de pasajeros rueda por la pista en línea recta hasta detenerse a una velocidad promedio de −35.0 km/h. Si el avión tarda 7.00 s en llegar al reposo, ¿cuáles son la velocidad y la aceleración iniciales?

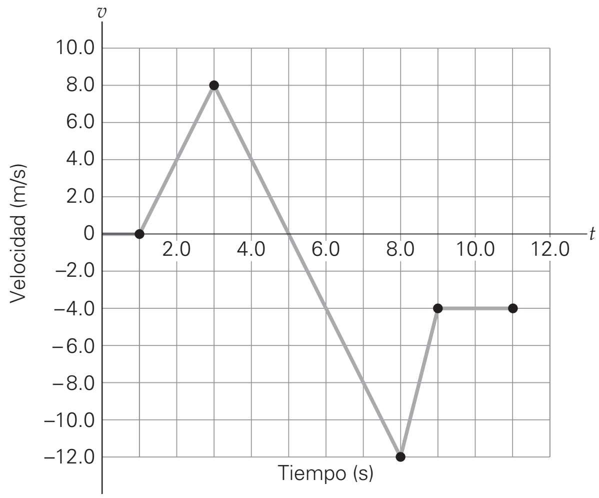
48. ●● Un tren que recorre una vía recta y a nivel tiene una rapidez inicial de 35.0 km/h. Se aplica una aceleración uniforme de $1.50\ m/s^2$ mientras el tren recorre 200 m. *a*) ¿Cuál es la rapidez del tren al final de esta distancia? *b*) ¿Cuánto tiempo le toma al tren recorrer los 200 m?

49. ●● Un disco (*puck*) de hockey que se desliza sobre hielo choca de frente contra las vallas de la cancha, moviéndose hacia la izquierda con una rapidez de 35 m/s. Al invertir su dirección, está en contacto con las vallas por 0.095 s, antes de rebotar con una rapidez menor de 11 m/s. Determine la aceleración promedio que experimentó el disco al chocar contra las vallas. Las aceleraciones típicas de los automóviles son de $5\ m/s^2$. Comente su respuesta y diga por qué es tan diferente de este último valor, especialmente cuando las rapideces del disco de hockey son similares a las de los automóviles.

50. ●● Calcule la aceleración para cada segmento de la gráfica de la ▼figura 2.22. Describa el movimiento del objeto durante el intervalo total de tiempo.



▲ **FIGURA 2.22 Velocidad contra tiempo**
Véanse los ejercicios 50 y 75.



▲ **FIGURA 2.23 Velocidad contra tiempo** Véanse los ejercicios 51 y 79.

51. ●● La ▲figura 2.23 muestra una gráfica de velocidad contra tiempo para un objeto en movimiento rectilíneo. *a*) Calcule la aceleración para cada fase del movimiento. *b*) Describa el movimiento del objeto durante el último segmento de tiempo.

52. ●● Un automóvil que viaja inicialmente hacia la derecha, con una rapidez constante de 25 m/s durante 5.0 s, aplica los frenos y reduce su rapidez a una tasa constante de 5 m/s^2 durante 3.0 s. Entonces continúa viajando hacia la derecha a una rapidez constante pero menor sin volver a frenar durante otros 6.0 s. *a*) Para facilitar los cálculos, trace una gráfica de la velocidad del automóvil contra tiempo, asegurándose de mostrar los tres intervalos. *b*) ¿Cuál es su velocidad después de los 3.0 s de frenado? *c*) ¿Cuál fue su desplazamiento total durante los 14.0 s de su movimiento? *d*) ¿Cuál fue su rapidez promedio durante los 14.0 s?

53. ●●● Un tren normalmente viaja con rapidez uniforme de 72 km/h por un tramo largo de vía recta y plana. Cierto día, el tren debe hacer una parada de 2.0 min en una estación sobre esta vía. Si el tren desacelera con una tasa uniforme de 1.0 m/s^2 y, después de la parada, acelera con una tasa de 0.50 m/s^2, ¿cuánto tiempo habrá perdido por parar en la estación?

2.4 Ecuaciones de cinemática (aceleración constante)

54. OM Para una aceleración rectilínea constante, la gráfica de velocidad contra tiempo es *a*) una línea horizontal, *b*) una línea vertical, *c*) una línea recta no horizontal ni vertical o *d*) una línea curva.

55. OM Para una aceleración rectilínea constante, la gráfica de posición contra tiempo sería *a*) una línea horizontal, *b*) una línea vertical, *c*) una línea recta no horizontal ni vertical o *d*) una curva.

56. OM Un objeto acelera uniformemente desde el reposo durante *t* segundos. La rapidez media del objeto en este intervalo de tiempo es *a*) $\frac{1}{2}at$, *b*) $\frac{1}{2}at^2$, *c*) $2at$, *d*) $2at^2$.

57. PC Si la gráfica de la velocidad de un objeto *versus* tiempo es una línea horizontal, ¿qué podría decirse acerca de la aceleración del objeto?

58. PC Al resolver una ecuación cinemática para x, que tiene una aceleración negativa, ¿x es necesariamente negativa?

59. PC ¿Cuántas variables deben conocerse para resolver una ecuación cinemática?

60. PC Un compañero de clase afirma que la aceleración negativa siempre significa que un objeto en movimiento está desacelerando. ¿Es verdadera esta afirmación? Explique su respuesta.

61. ● En un rally de autos deportivos, un automóvil que parte del reposo acelera uniformemente con una tasa de 9.0 m/s^2 a lo largo de una distancia recta de 100 m. El tiempo a superar en este evento es 4.5 s. ¿Lo logra el conductor? ¿Qué aceleración mínima se requiere para hacerlo?

62. ● Un automóvil acelera desde el reposo con tasa constante de 2.0 m/s^2 durante 5.0 s. *a*) ¿Qué rapidez tendrá al término de ese lapso? *b*) ¿Qué distancia recorrerá en ese tiempo?

63. ● Un automóvil que viaja a 25 mi/h debe parar en un tramo de 35 m de una carretera. *a*) ¿Qué magnitud mínima debe tener su aceleración? *b*) ¿Cuánto tiempo tardará en detenerse el auto con esa desaceleración?

64. ● Una lancha de motor que viaja por una pista recta frena uniformemente de 60 a 40 km/h en una distancia de 50 m. Calcule la aceleración de la lancha.

65. ●● El conductor de una camioneta que va a 100 km/h aplica los frenos y el vehículo desacelera uniformemente a 6.50 m/s^2 en una distancia de 20.0 m. *a*) ¿Qué rapidez en km/h tiene la camioneta al término de esta distancia? *b*) ¿Cuánto tiempo ha transcurrido?

66. ●● Un carro cohete experimental que parte del reposo alcanza una rapidez de 560 km/h adespués de un recorrido recto de 400 m en una llanura plana. Suponiendo que la aceleración fue constante, *a*) ¿qué tiempo tardó el recorrido? *b*) ¿Qué magnitud tuvo la aceleración?

67. ●● Un carro cohete viaja con rapidez constante de 250 km/h por una llanura. El conductor imparte al vehículo un empuje en reversa y el carro experimenta una desaceleración continua y constante de 8.25 m/s^2. ¿Cuánto tiempo transcurre hasta que el vehículo está a 175 m del punto donde se aplicó el empuje en reversa? Describa la situación en su respuesta.

68. ●● Dos automóviles idénticos que pueden acelerar a 3.00 m/s^2 compiten en una pista recta con arranque en movimiento. El carro A tiene una rapidez inicial de

2.50 m/s; el B, de 5.0 m/s. *a*) Calcule la separación de los dos automóviles después de 10 s. *b*) ¿Qué automóvil se mueve con mayor velocidad después de 10 s?

69. ●● De acuerdo con las leyes de Newton del movimiento (que estudiaremos en el capítulo 4), una pendiente de 30° que no ejerce fricción debería proveer una aceleración de 4.90 m/s^2 hacia la parte inferior. Un estudiante con un cronómetro registra que un objeto, que parte del reposo, se desliza 15.00 m hacia abajo por una suave pendiente en exactamente 3.00 s. ¿En verdad la pendiente no ejerce fricción?

70. **EI** ●● Un objeto se mueve en la dirección $+x$ con una rapidez de 40 m/s. Al pasar por el origen, comienza a experimentar una aceleración constante de 3.5 m/s^2 en la dirección $-x$. *a*) ¿Qué sucederá después? 1) El objeto invertirá su dirección de movimiento en el origen. 2) El objeto seguirá viajando en la dirección $+x$. 3) El objeto viajará en la dirección $+x$ y luego invertirá su dirección. ¿Por qué? *b*) ¿Cuánto tiempo transcurre antes de que el objeto vuelva al origen? *c*) ¿Qué velocidad tiene el objeto al volver al origen?

71. ●● Una bala de rifle cuya rapidez al salir del cañón es 330 m/s se dispara directamente a un material denso especial que la detiene en 25 cm. Suponiendo que la desaceleración de la bala fue constante, ¿qué magnitud tuvo?

72. ●● El límite de velocidad en una zona escolar es 40 km/h (aproximadamente 25 mi/h). Un conductor que viaja a esa velocidad ve que un niño cruza corriendo la calle 13 m adelante de su automóvil. Aplica los frenos, y el automóvil desacelera con una tasa uniforme de 8.0 m/s^2. Si el tiempo de reacción del conductor es 0.25 s, ¿el auto se detendrá antes de golpear al niño?

73. ●● Suponiendo un tiempo de reacción de 0.50 s para el conductor del ejercicio 72, ¿el automóvil se detendrá antes de golpear al niño?

74. ●● Una bala que viaja horizontalmente con una rapidez de 350 m/s golpea una tabla perpendicular a la superficie, la atraviesa y sale por el otro lado con una rapidez de 210 m/s. Si la tabla tiene 4.00 cm de grosor, ¿cuánto tardará la bala en atravesarla?

75. ●● *a*) Demuestre que el área bajo la curva de una gráfica de velocidad contra tiempo, con aceleración constante, es igual al desplazamiento. [*Sugerencia:* el área de un triángulo es $ab/2$, o la mitad de la altura multiplicada por la base.] *b*) Calcule la distancia recorrida en el movimiento representado en la figura 2.22.

76. **EI** ●● Un objeto que está inicialmente en reposo experimenta una aceleración de 2.00 m/s^2 en una superficie horizontal. En estas condiciones, recorre 6.0 m. Designemos los primeros 3.00 m como la fase 1 utilizando un subíndice 1 para esas cantidades, y los siguientes 3.00 m como la fase 2 empleando un subíndice 2. *a*) ¿Cómo deberían relacionarse los tiempos para recorrer cada fase y la condición: 1) $t_1 < t_2$; 2) $t_1 = t_2$, o 3) $t_1 > t_2$? *b*) Ahora calcule los dos tiempos de recorrido y compárelos cuantitativamente.

77. **EI** ●● Un automóvil inicialmente en reposo experimenta pérdida de su freno de mano conforme desciende por una colina recta con una aceleración constante de 0.850 m/s^2, y recorre un total de 100 m. Designemos la primera mitad de la distancia como fase 1, utilizando un subíndice 1 para tales cantidades; y la segunda mitad como fase 2, empleando un subíndice 2. *a*) ¿Con qué condición deberían relacionarse las rapideces del automóvil al final de cada fase? 1) $v_1 < \frac{1}{2}v_2$; 2) $v_1 = \frac{1}{2}v_2$; o 3) $v_1 > \frac{1}{2}v_2$? *b*) Ahora calcule los dos valores de rapidez y compárelos cuantitativamente.

78. ●● Un objeto inicialmente en reposo experimenta una aceleración de 1.5 m/s^2 durante 6.0 s y luego viaja a velocidad constante por otros 8.0 s. ¿Cuál es la velocidad promedio del objeto durante el intervalo de 14 s?

79. ●●● La figura 2.23 muestra una gráfica de velocidad contra tiempo para un objeto en movimiento rectilíneo. *a*) Calcule las velocidades instantáneas a $t = 8.0$ s y $t = 11.0$ s. *b*) Calcule el desplazamiento final del objeto. *c*) Calcule la distancia total que el objeto recorre.

80. **EI** ●●● *a*) Un automóvil que viaja con rapidez v puede frenar para hacer un alto de emergencia en una distancia x. Suponiendo que las demás condiciones de manejo son similares, si la rapidez del automóvil es el doble, la distancia de frenado será 1) $\sqrt{2}x$, 2) $2x$, o 3) $4x$. *b*) Un conductor que viaja a 40.0 km/h en una zona escolar puede frenar para hacer un alto de emergencia en 3.00 m. Calcule la distancia de frenado si el automóvil viajara a 60.0 km/h?

81. ●●● Un automóvil acelera horizontalmente desde el reposo en un camino horizontal con aceleración constante de 3.00 m/s^2. Por el camino, pasa por dos fotoceldas (“ojos eléctricos”, designados como 1 el primero y como 2 el segundo), que están separadas 20.0 m entre sí. El intervalo de tiempo para recorrer esta distancia de 20.0 m, según las fotoceldas, es 1.40 s. *a*) Calcule la rapidez del vehículo al pasar por cada ojo eléctrico. *b*) ¿Qué distancia hay entre el punto de partida y el primer ojo eléctrico? *c*) ¿Cuánto tiempo le tomará al auto llegar al primer ojo eléctrico?

82. ●●● Un automóvil viaja por una carretera larga y recta con una rapidez constante de 75.0 mi/h cuando la conductora ve un accidente 150 m más adelante. De inmediato, aplica el freno (ignore el tiempo de reacción). Entre ella y el accidente hay dos superficies diferentes. Primero hay 100 m de hielo (¡es el Oeste medio de E.U.!), donde su desaceleración es apenas de 1.00 m/s^2. A partir de ahí se encuentra sobre concreto seco, donde su desaceleración, ahora más normal, es de 7.00 m/s^2. *a*) ¿Cuál era su rapidez justo después de dejar la porción del camino cubierta de hielo? *b*) ¿Cuánta distancia recorre en total para detenerse? *c*) ¿Cuánto tiempo tarda en total para detenerse?

2.5 Caída libre

Sin considerar resistencia del aire en estos ejercicios.

83. **OM** Un objeto se lanza verticalmente hacia arriba. ¿Cuál de estas afirmaciones es cierta? *a*) Su velocidad cambia de manera no uniforme; *b*) su altura máxima es independiente de la velocidad inicial; *c*) su tiempo de ascenso es un poco mayor que su tiempo de descenso; *d*) la rapidez al volver a su punto de partida es igual a su rapidez inicial?

84. **OM** El movimiento de caída libre descrito en esta sección es válido para *a*) un objeto que se deja caer desde el reposo, *b*) un objeto que se lanza verticalmente hacia abajo, *c*) un objeto que se lanza verticalmente hacia arriba o *d*) todos los casos anteriores.

85. **OM** Un objeto que se suelta en caída libre *a*) cae 9.8 m cada segundo, *b*) cae 9.8 m durante el primer segundo, *c*) tiene un incremento de velocidad de 9.8 m/s cada segundo o *d*) tiene un incremento de aceleración de 9.8 m/s^2 cada segundo.

86. **OM** Se lanza un objeto en línea recta hacia arriba. Cuando alcanza su altura máxima: *a*) su velocidad es cero, *b*) su aceleración es cero, *c*) *a* y *b*.

87. **OM** Cuando un objeto se lanza verticalmente hacia arriba, está acelerando en *a*) su trayecto hacia arriba, *b*) su trayecto hacia abajo, *c*) *a* y *b*.

88. **PC** Cuando una pelota se lanza hacia arriba, ¿qué velocidad y aceleración tiene en su punto más alto?

89. **PC** Imagine que está en el espacio lejos de cualquier planeta, y lanza una pelota como lo haría en la Tierra. Describa el movimiento de la pelota.

90. **PC** Usted deja caer una piedra desde la ventana de un edificio. Después de un segundo, deja caer otra piedra. ¿Cómo varía con el tiempo la distancia que separa a las dos piedras?

91. **PC** ¿Cómo diferirá la caída libre que se experimenta en la Luna de la que se experimenta en la Tierra?

92. ● Un estudiante deja caer una pelota desde la azotea de un edificio alto; la pelota tarda 2.8 s en llegar al suelo. *a*) ¿Qué rapidez tenía la pelota justo antes de tocar el suelo? *b*) ¿Qué altura tiene el edificio?

93. **EI** ● El tiempo que un objeto que se deja caer desde el acantilado A tarda en chocar con el agua del lago que está abajo, es el doble del tiempo que tarda en llegar al lago otro objeto que se deja caer desde el acantilado B. *a*) La altura del acantilado A es 1) la mitad, 2) el doble o 3) cuatro veces la del acantilado B. *b*) Si el objeto tarda 1.8 s en caer del acantilado A al agua, ¿qué altura tienen los dos acantilados?

94. ● Para el movimiento de un objeto que se suelta en caída libre, dibuje la forma general de las gráficas *a*) v contra t y *b*) y contra t.

95. ● Un truco muy conocido consiste en dejar caer un billete de dólar (a lo largo) entre el pulgar y el índice de un compañero, diciéndole que lo sujete lo más rápidamente posible para quedarse con él. (La longitud del billete es de 15.7 cm, y el tiempo de reacción medio del ser humano es de unos 0.2 s. Véase la figura 2.15.) ¿Esta propuesta es un buen negocio? Justifique su respuesta.

96. ● Un niño lanza una piedra hacia arriba con una rapidez inicial de 15 m/s. ¿Qué altura máxima alcanzará la piedra antes de descender?

97. ● En el ejercicio 96 ¿qué altura máxima alcanzaría la piedra si el niño y la piedra estuvieran en la superficie de la Luna, donde la aceleración debida a la gravedad es sólo 1.67 m/s^2 ?

98. ●● El techo de una aula está 3.75 m sobre el piso. Un estudiante lanza una manzana verticalmente hacia arriba, soltándola a 0.50 m sobre el piso. Calcule la rapidez inicial máxima que puede darse a la manzana sin que toque el techo?

99. ●● Las Torres Gemelas Petronas de Malasia y la Torre Sears de Chicago tienen alturas de 452 y 443 m, respectivamente. Si se dejaran caer objetos desde la punta de cada una, ¿con qué diferencia de tiempo llegarían al suelo?

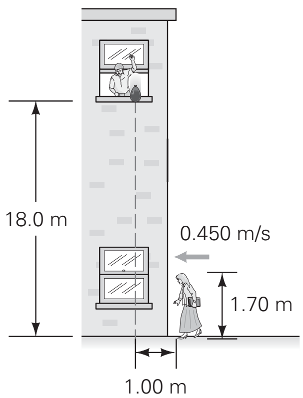
100. ●● Usted lanza una piedra verticalmente hacia arriba con una rapidez inicial de 6.0 m/s desde la ventana de una oficina del tercer piso. Si la ventana está 12 m sobre el suelo, calcule *a*) el tiempo que la piedra está en el aire y *b*) la rapidez que tiene la piedra justo antes de tocar el suelo.

101. **EI** ●● Una pelota Superball se deja caer desde una altura de 4.00 m. Suponiendo que la pelota rebota con el 95% de su rapidez de impacto, *a*) ¿rebotaría a 1) menos de 95%, 2) 95.0% o 3) más de 95% de la altura inicial? *b*) ¿Qué altura alcanzara la pelota?

102. ●● En un estadio de béisbol cubierto con un domo, el techo está diseñado de manera que las bolas bateadas no se estrellen contra él. Suponga que la máxima rapidez de una bola que se lanza en un partido de las ligas mayores es 95.0 mi/h y que el bat de madera la reduce a 80.0 mi/h. Suponga que la bola pierde contacto con el bat a una altura de 1.00 m del campo del juego. *a*) Determine la altura mínima que debe tener el techo, de manera que las bolas que salen disparadas por el bat que las lanza en línea recta hacia arriba no lo golpeen. *b*) En un juego real, una bola bateada llega a menos de 10.0 m de esta altura del techo. ¿Cuál era la rapidez de la bola al perder salir diparada por el bat?

103. ●● Durante el experimento descrito en el libro acerca de una pluma y un martillo que se dejan caer en la Luna, ambos objetos se liberaron desde una altura de 1.30 m. De acuerdo con el video del experimento, ambos tardaron 1.26 s en golpear la superficie lunar. *a*) ¿Cuál es el valor local de la aceleración de la gravedad en ese lugar de la Luna? *b*) ¿Qué rapidez llevaban los dos objetos justo antes de golpear la superficie?

104. ●● En la ▾figura 2.24 un estudiante en una ventana del segundo piso de una residencia ve que su profesora de matemáticas camina por la acera junto al edificio. Deja caer un globo lleno de agua desde 18.0 m sobre el suelo cuando la profesora está a 1.00 m del punto que está directamente abajo de la ventana. Si la estatura de la profesora es de 170 cm y camina con una rapidez de 0.450 m/s, ¿la golpeará el globo? Si no, ¿qué tan cerca pasará de ella?

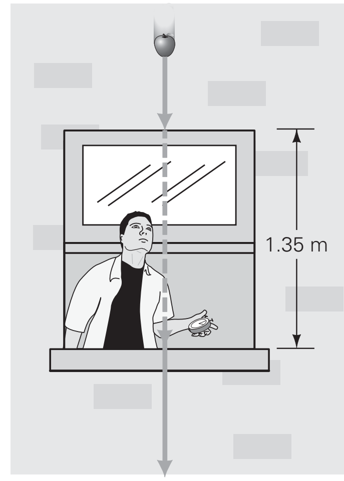


▲ **FIGURA 2.24 Bañe a la profesora** Véase el ejercicio 104. (Esta figura no está a escala.)

105. ●● Un fotógrafo en un helicóptero, que asciende verticalmente con una tasa constante de 12.5 m/s, deja caer accidentalmente una cámara por la ventana cuando el helicóptero está 60.0 m sobre el suelo. *a*) ¿Cuánto tardará la cámara en llegar al suelo? *b*) ¿Con qué rapidez chocará?

106. **EI** ●● La aceleración debida a la gravedad en la Luna es la sexta parte que en la Tierra. *a*) Si un objeto se dejara caer desde la misma altura en la Luna y en la Tierra, el tiempo que tardaría en llegar a la superficie de la Luna sería 1) $\sqrt{6}$, 2) 6 o 3) 36 veces mayor que el que tardaría en la Tierra. *b*) Para el caso de un proyectil con una velocidad inicial de 18.0 m/s hacia arriba, calcule la altura máxima y el tiempo total de vuelo en la Luna y en la Tierra?

107. ●●● Un objeto que se dejó caer tarda 0.210 s en pasar por una ventana de 1.35 m de altura. ¿Desde qué altura arriba del borde superior de la ventana se soltó el objeto? (Véase la ▸figura 2.25.)



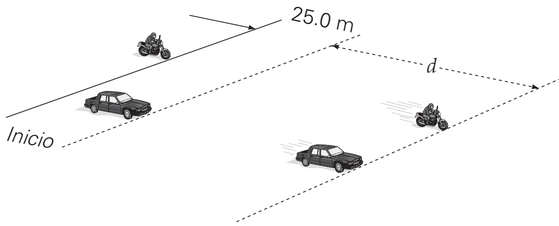
▲ **FIGURA 2.25 ¿De dónde vino?** Véase el ejercicio 107.

108. ●●● Una pelota de tenis se deja caer desde una altura de 10.0 m. Rebota en el piso y vuelve a subir a una altura de 4.00 m en su primer rebote. (Ignore el breve momento en que la pelota está en contacto con el piso.) *a*) Determine la rapidez de la pelota justo antes de que golpea el suelo en su trayectoria hacia abajo. *b*) Determine la rapidez de la pelota al rebotar en el piso en su trayecto ascendente hacia la altura de su primer rebote. *c*) ¿Por cuánto tiempo está la pelota en el aire desde el momento en que se deja caer hasta el momento en que alcanza la altura máxima de su primer rebote

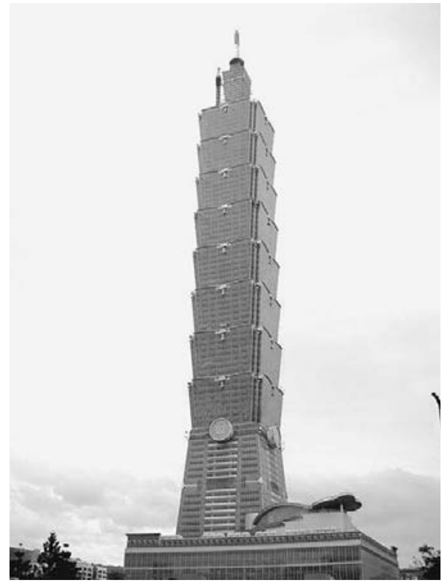
109. ●●● Un cohete para recoger muestras de contaminantes se lanza en línea recta hacia arriba con una aceleración constante de 12.0 m/s^2, en los primeros 1000 m de vuelo. En ese punto, los motores se apagan y el cohete desciende por sí solo en caída libre. Ignore la resistencia del aire. *a*) ¿Cuál es la rapidez del cohete cuando los motores se apagan? *b*) ¿Cuál es la altura máxima que alcanza este cohete? *c*) ¿Cuánto tiempo le toma alcanzar su altura máxima?

110. ●●● Un cohete de prueba que contiene una sonda, para determinar la composición de la atmósfera superior, se dispara verticalmente hacia arriba desde una posición inicial a nivel del suelo. Durante el tiempo t que dura el combustible, el cohete asciende con aceleración constante hacia arriba de magnitud $2g$. Suponga que la altura que alcanza el cohete no es tan grande como para que la fuerza gravitacional de la Tierra no deba considerarse constante. *a*). ¿Qué altura y rapidez tiene el cohete cuando se agota el combustible? *b*) ¿Qué altura máxima alcanza el cohete? *c*) Si $t = 30.0$ s, calcule la altura máxima del cohete.

111. ●●● Un automóvil y una motocicleta parten del reposo al mismo tiempo en una pista recta; pero la motocicleta está 25.0 m atrás del automóvil (▸figura 2.26). El automóvil acelera con una tasa uniforme de 3.70 m/s^2, y la motocicleta, a 4.40 m/s^2. *a*) ¿Cuánto tardará la motocicleta en alcanzar al automóvil? *b*) ¿Qué distancia habrá recorrido cada vehículo durante ese tiempo? *c*) ¿Qué tan adelante del auto estará la motocicleta 2.00 s después? (Ambos vehículos siguen acelerando.)



▲ **FIGURA 2.26 Carrera empatada** Véase el ejercicio 111. (La figura no está a escala.)



▲ **FIGURA 2.27 La más alta** La torre Taipei 101 en Taiwán es el edificio más alto del mundo. Con 101 pisos, tiene una altura de 509 m (1671 ft). La torre se terminó en 2004.

Ejercicios adicionales

112. Dos atletas corren con la misma rapidez promedio. El corredor A corta directamente hacia el norte siguiendo el diámetro de una pista circular, mientras que el corredor B recorre todo el semicírculo para encontrarse con su compañero en el lado opuesto de la pista. Suponga que la rapidez promedio común es de 2.70 m/s y que la pista tiene un diámetro de 150 m. *a*) ¿El corredor A llega cuántos segundos antes que el corredor B? *b*) ¿Cómo se comparan sus distancias de recorrido? *c*) ¿Cómo se comparan sus desplazamientos? *d*) ¿Cómo se comparan sus velocidades promedio?

113. Muchas carreteras con bajadas pronunciadas cuentan con rampas de emergencia, diseñadas para que en el caso de que un vehículo se quede sin frenos, el conductor pueda ingresar en ellas (por lo general, están cubiertas con grava suelta). La idea es que el vehículo llegue a la rampa y se detenga (en la grava) sin necesidad del sistema de frenos. En una región de Hawai, la longitud de la rampa de emergencia es de 300 m y ésta permite una desaceleración (constante) de 2.50 m/s^2. *a*) ¿Cuál es la rapidez máxima que un vehículo que se sale de la carretera puede llevar al tomar la rampa? *b*) ¿Cuánto tiempo le llevará a ese vehículo alcanzar el reposo? *c*) Suponga que otro vehículo, que va 10 mi/h (4.47 m/s) más rápido que el valor máximo, toma la rampa de emergencia. ¿Con qué rapidez irá al salir del área de grava?

114. El edificio más alto del mundo es la Torre Taipei 101 en Taipei, Taiwán, con 509 m (1667 ft) de altura y 101 pisos (▸figura 2.27). El mirador se encuentra en el piso 89, y los dos elevadores que llegan a ese lugar alcanzan una rapidez máxima de 1008 m/min cuando suben y 610 m/min cuando bajan. Suponiendo que estos valores máximos de rapidez se alcanzan en el punto medio del trayecto y que las aceleraciones son constantes para cada tramo de éste, *a*) ¿cuáles son las aceleraciones para el trayecto hacia arriba y para el trayecto hacia abajo? *b*) ¿Cuánto tiempo más tarda el viaje de bajada que el de subida?

115. A nivel del piso, Superman ve a Luisa Lane en problemas cuando el villano, Lex Luthor, la deja caer casi desde el último piso del edificio del Empire State. De inmediato, el Hombre de Acero empieza a volar a una aceleración constante para intentar rescatar en el aire a Luisa. Suponiendo que ella cayó desde una altura de 300 m y que Superman puede acelerar en línea recta hacia arriba a 15 m/s^2, determine *a*) ¿qué distancia caerá Luisa por el aire antes de que Superman la salve?, *b*) ¿cuánto tardará Superman en alcanzarla y *c*) la rapidez de uno y otro en el instante en que él la alcanza. Comente si esta rapidez sería peligrosa para Luisa, quien, al ser una común mortal, podría resultar lesionada al chocar con el indestructible Hombre de Acero, si las rapideces que llevan uno y otro son muy altas.

116. En la década de 1960 hubo un concurso para encontrar el automóvil que fuera capaz de realizar las siguientes dos maniobras (una justo después de la otra) en el menor tiempo total: primero, acelerar desde el reposo hasta 100 mi/h (45.0 m/s), y luego frenar hasta detenerse por completo. (Ignore la corrección del tiempo de reacción que ocurre entre las fases de aceleración y de frenado, y suponga que todas las aceleraciones son constantes.) Por varios años, el ganador fue el “auto de James Bond”, el Aston Martin. Un año ganó el concurso cuando tardó sólo ¡un total de 15.0 segundos en realizar las dos proezas! Se sabe que su aceleración de frenado (desaceleración) fue asombrosamente de 9.00 m/s^2. *a*) Calcule el tiempo que duró la fase de frenado. *b*) Calcule la distancia que recorrió durante la fase de frenado. *c*) Calcule la aceleración del automóvil durante la fase de aceleración. *d*) Calcule la distancia que recorrió para alcanzar 100 mi/h.

117. Vamos a investigar un posible descenso vertical de una nave sobre la superficie de Marte, que incluye dos etapas: caída libre seguida por el despliegue de un paracaídas. Suponga que la sonda está cerca de la superficie, de manera que la aceleración de la gravedad en Marte es constante con un valor de 3.00 m/s^2. Suponga que la nave desciende, en un principio, verticalmente a 200 m/s a una altura de 20 000 m de la superficie del planeta. Ignore la resistencia del aire durante la fase de caída libre. Suponga que primero cae libremente una distancia de 8 000 m. (El paracaídas no se abre sino hasta que la nave está a 12 000 m de la superficie. Véase la figura 2.28.) *a*) Determine la rapidez de la nave espacial al final de los 8 000 m de caída libre. *b*) A 12 000 m de la superficie, el paracaídas se despliega y la nave *inmediatamente* empieza a disminuir su rapidez. Si la sonda es capaz de resistir el choque contra la superficie hasta los 20.0 m/s, determine la desaceleración mínima constante necesaria durante esta fase. *c*) ¿Cuál es el tiempo total que tarda en llegar a la superficie desde la altura original de 20 000 m?

▲ **FIGURA 2.28** ¡Ahí va! Véase el ejercicio 117.

Los siguientes problemas de física Physlet se pueden utilizar con este capítulo.
1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.18

CAPÍTULO 3

MOVIMIENTO EN DOS DIMENSIONES

HECHOS DE FÍSICA

- Origen de las palabras:
  - *cinemática*: del griego *kinema*, que significa “movimiento”.
  - *velocidad*: del latín *velocitas*, que significa “rapidez”.
  - *aceleración*: del latín *accelerare*, que significa “apresurar”.
- Proyectiles:
  - “Big Bertha”, una pieza de artillería que utilizaron los alemanes durante la Primera Guerra Mundial; su cañón medía 6.7 m (22 ft) y era capaz de lanzar proyectiles de 820 kg (1800 lb) a 15 km (9.3 millas).
  - El “Paris Gun”, otra pieza de artillería que utilizaron los alemanes durante la Primera Guerra Mundial, con un cañón de 34 m (112 ft) de largo, era capaz de lanzar proyectiles de 120 kg (264 lb) a 131 km (81 millas). Este obús se diseñó para bombardear París, Francia, y sus proyectiles alcanzaban una altura máxima de 40 km (25 millas) durante su trayectoria de 170 s.
  - Para alcanzar la distancia máxima a nivel de tierra, un proyectil, de manera ideal, debería lanzarse con un ángulo de 45°. Con la resistencia del aire, la rapidez del proyectil se reduce, al igual que el alcance. El ángulo de proyección para el alcance máximo en este caso es menor de 45°, lo que da un mayor componente horizontal de la velocidad inicial, para ayudar a compensar la resistencia del aire.
  - El disco que se utiliza en las competencias deportivas es aerodinámico y, al lanzarlo, se le da cierta elevación. Por lo tanto, para lograr el alcance máximo, se requiere un mayor componente horizontal de velocidad inicial; de esta manera, el disco recorrerá una mayor distancia horizontalmente, mientras se eleva verticalmente.
- Récords de lanzamiento de disco:
  - Mujeres: 76.80 m (252 ft).
  - Hombres: 74.08 m (243 ft).
  - El disco que lanzan los hombres tiene una masa de 2 kg (4.4 lb), en tanto que el de las mujeres tiene una masa de 1 kg (2.2 lb).

¡Sí *puede* llegar desde aquí! Sólo es cuestión de saber qué camino tomar en el cruce. Pero, ¿alguna vez se ha preguntado el lector por qué tantos caminos se cruzan en ángulo recto? Hay un buen motivo. Puesto que vivimos en la superficie terrestre, estamos acostumbrados a describir los lugares en dos dimensiones, y una de las formas más sencillas de hacerlo es tomando como referencia dos ejes perpendiculares. Cuando queremos explicar a alguien cómo llegar a cierto lugar en la ciudad, le decimos, por ejemplo: “Camina cuatro cuadras hacia el centro y luego tres a la derecha”. En el campo podríamos decir: “Camina cinco kilómetros al sur y luego uno al este”. En ambos casos, necesitamos saber qué tan lejos ir en dos direcciones que están a 90° una de la otra.

Podríamos utilizar el mismo enfoque para describir el movimiento, y éste no tiene que ser en línea recta. Como veremos a continuación, también podemos usar vectores, que presentamos en el capítulo 2, para describir movimiento en trayectorias curvas. El análisis de un movimiento *curvilíneo* nos permitirá estudiar el comportamiento de pelotas bateadas, planetas en órbita alrededor del Sol e incluso electrones en átomos.

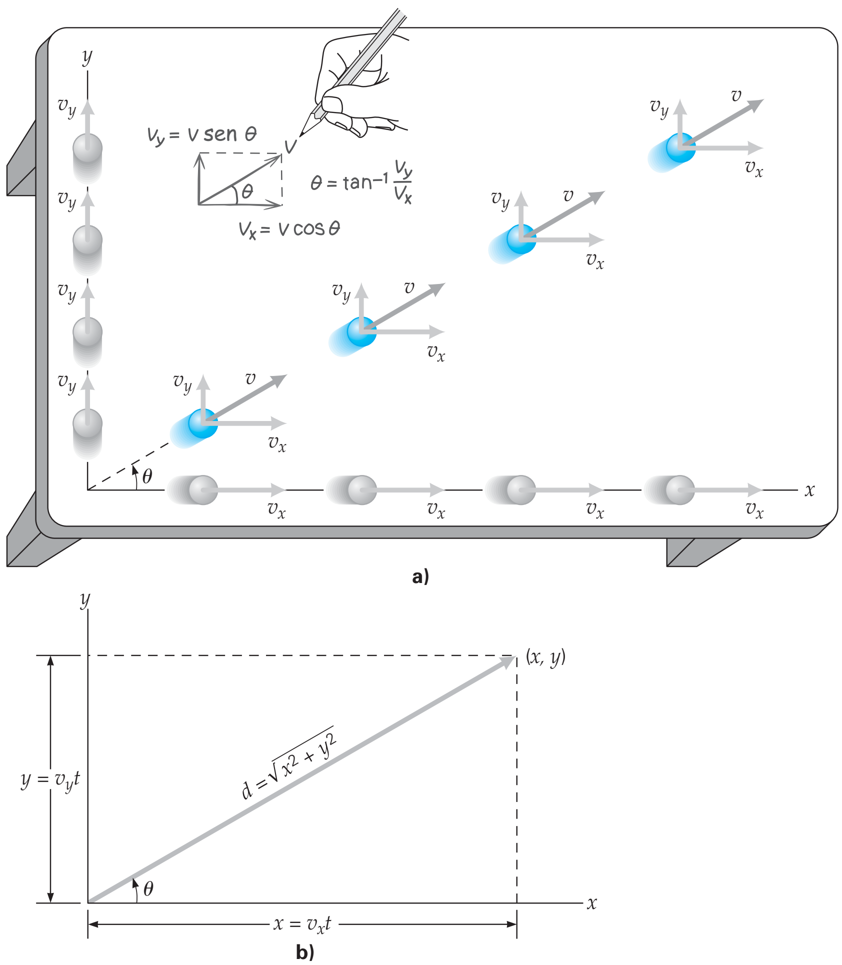
El movimiento curvilíneo puede analizarse empleando los componentes rectangulares del movimiento. En esencia, descomponemos el movimiento curvo en componentes rectangulares (x y y), y examinamos el movimiento en ambas dimensiones simultáneamente. Podemos aplicar a esos componentes las ecuaciones de cinemática que examinamos en el capítulo 2. Por ejemplo, para un objeto que se mueve en una trayectoria curva, las coordenadas x y y del movimiento en cualquier momento dan la posición del objeto en cualquier punto.

3.1 Componentes del movimiento

OBJETIVOS: *a*) Analizar el movimiento en términos de sus componentes, y *b*) aplicar las ecuaciones de cinemática a componentes de movimiento.

En el capítulo 1 consideramos que un objeto que se mueve en línea recta se mueve a lo largo de uno de los ejes cartesianos (x o y). Sin embargo, ¿qué pasa si el movimiento no se da a lo largo de un eje? Por ejemplo, consideremos la situación que se ilustra en la ▼figura 3.1, donde tres pelotas se mueven de manera uniforme sobre una mesa. La pelota que rueda en línea recta a lo largo de un costado de la tabla, designado como dirección x, se mueve en una dimensión. Es decir, su movimiento se puede describir con

▼ **FIGURA 3.1 Componentes del movimiento** ***a)*** La velocidad (y el desplazamiento) de un movimiento rectilíneo uniforme —el de la pelota azul oscuro— podría tener componentes x y y (v_x y v_y, como indica el dibujo a lápiz) debido a la orientación que se eligió para los ejes de coordenadas. Observe que la velocidad y el desplazamiento de la pelota en la dirección x son exactamente los que tendría una pelota que rueda a lo largo del eje x con una velocidad uniforme v_x. Se cumple una relación similar para el movimiento de la pelota en la dirección y. Puesto que el movimiento es uniforme, el cociente v_y/v_x (y por lo tanto θ) es constante. ***b)*** Podemos calcular las coordenadas (x, y) de la posición de la pelota y la distancia d que ha recorrido desde el origen, para cualquier tiempo t.



una sola coordenada, x, como hicimos con el movimiento en el capítulo 2. De forma similar, el movimiento de la pelota que se desplaza en la dirección y se puede describir con una sola coordenada y. En cambio, necesitamos ambas coordenadas, x y y, para describir el movimiento de la pelota que rueda diagonalmente por la mesa. Decimos entonces que este movimiento se describe *en dos dimensiones*.

Podríamos observar que, si la pelota que se mueve en diagonal fuera el único objeto a considerar, se podría elegir el eje x en la dirección del movimiento de esa pelota, y así el movimiento quedaría reducido a una sola dimensión. Esta observación es cierta, pero una vez que se fijan los ejes de coordenadas, los movimientos que no se realicen sobre ellos se deberán describir con dos coordenadas (x, y), es decir, en dos dimensiones. También hay que tener en cuenta que no todos los movimientos en un plano (dos dimensiones) son en línea recta. Pensemos en la trayectoria de una pelota que lanzamos a otro individuo. La trayectoria de semejante movimiento del proyectil es curva. (Estudiaremos tal movimiento en la sección 3.3.) Por lo general, se requieren ambas coordenadas.

Al considerar el movimiento de la pelota que se mueve diagonalmente por la mesa en la figura 3.1a, podemos pensar que la pelota se mueve simultáneamente en las direcciones x y y. Es decir, tiene una velocidad en la dirección x (v_x) y una en la dirección y (v_y) al mismo tiempo. Los componentes de velocidad combinados describen el movimiento real de la pelota. Si la pelota tiene una velocidad constante v en una dirección que forma un ángulo θ con el eje x, las velocidades en las direcciones x y y se obtendrán descomponiendo el vector de velocidad en **componentes de movimiento** en esas direcciones, como muestra el dibujo a lápiz de la figura 3.1a. Ahí vemos que los componentes v_x y v_y tienen las magnitudes

Ilustración 3.1 Descomposición de vectores

$$v_x = v \cos\theta \tag{3.1a}$$

y

$$v_y = v \operatorname{sen}\theta \tag{3.1b}$$

respectivamente. (Observe que $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, de manera que v es una combinación de las velocidades en las direcciones x y y.)

El lector ya está familiarizado con el uso de componentes de longitud bidimensionales para encontrar las coordenadas x y y en un sistema cartesiano. En el caso de la pelota que rueda sobre la mesa, su posición (x, y), es decir, la distancia recorrida desde el origen en cada una de las direcciones componentes en el tiempo t, está dada por (ecuación 2.11 con $a = 0$)

$$x = x_o + v_x t \tag{3.2a}$$

$$y = y_o + v_y t \tag{3.2b}$$

Magnitud de componentes de desplazamiento (en condiciones de velocidad constante y cero aceleración)

respectivamente. (Aquí, x_o y y_o son las coordenadas de la pelota en $a = 0$, que podrían ser distintas de cero.) La distancia en línea recta desde el origen es entonces $d = \sqrt{x^2 + y^2}$ (figura 3.1b).

Cabe señalar que $\tan\theta = v_y/v_x$, así que la dirección del movimiento relativa al eje x está dada por $\theta = \tan^{-1}(v_y/v_x)$. (Véase el dibujo a mano de la figura 3.1a.) También, $\theta = \tan^{-1}(y/x)$. ¿Por qué?

En esta introducción a los componentes del movimiento, hemos colocado el vector de velocidad en el primer cuadrante $(0 < \theta < 90°)$, donde ambos componentes, x y y, son positivos. No obstante, como veremos con mayor detalle en la sección siguiente, los vectores pueden estar en cualquier cuadrante, y sus componentes pueden ser negativos. ¿Sabe usted en qué cuadrantes serían negativos los componentes v_x o v_y?

Ejemplo 3.1 ■ A rodar: uso de los componentes de movimiento

Si la pelota que se mueve en diagonal en la figura 3.1a tiene una velocidad constante de 0.50 m/s en un ángulo de 37° relativo al eje x, calcule qué distancia recorrerá en 3.0 s usando los componentes x y y de su movimiento.

Razonamiento. Dadas la magnitud y la dirección (ángulo) de la velocidad de la pelota, obtenemos los componentes x y y de la velocidad. Luego calculamos la distancia en cada dirección. Puesto que los ejes x y y son perpendiculares, el teorema de Pitágoras ofrece la distancia de la trayectoria rectilínea de la pelota, como se muestra en la figura 3.1b. (Tome nota del procedimiento: separar el movimiento en componentes, calcular lo necesario en cada dirección y recombinar si es necesario.)

Solución. Después de organizar los datos, tenemos

Dado: $v = 0.50$ m/s
$\theta = 37°$
$t = 3.0$ s

Encuentre: d (distancia recorrida)

La distancia recorrida por la pelota en términos de sus componentes x y y está dada por $d = \sqrt{x^2 + y^2}$. Para obtener x y y con la ecuación 3.2, primero necesitamos calcular los componentes de velocidad v_x y v_y (ecuación 3.1):

$$v_x = v \cos 37° = (0.50 \text{ m/s})(0.80) = 0.40 \text{ m/s}$$

$$v_y = v \operatorname{sen} 37° = (0.50 \text{ m/s})(0.60) = 0.30 \text{ m/s}$$

Así pues, con $x_o = 0$ y $y_o = 0$, las distancias componentes son

$$x = v_x t = (0.40 \text{ m/s})(3.0 \text{ s}) = 1.2 \text{ m}$$

y

$$y = v_y t = (0.30 \text{ m/s})(3.0 \text{ s}) = 0.90 \text{ m}$$

y la distancia real de la trayectoria es

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(1.2 \text{ m})^2 + (0.90 \text{ m})^2} = 1.5 \text{ m}$$

Ejercicio de refuerzo. Suponga que una pelota rueda diagonalmente por una mesa con la misma rapidez que en este ejemplo, pero desde la esquina inferior derecha, que se toma como origen del sistema de coordenadas, hacia la esquina superior izquierda, con un ángulo 37° relativo al eje $-x$. Calcule los componentes de velocidad en este caso. (¿Cambiaría la distancia?) (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

Sugerencia para resolver problemas

Observe que, en este sencillo caso, la distancia también puede obtenerse directamente $d = vt = (0.50 \text{ m/s})(3.0 \text{ s}) = 1.5$ m. Sin embargo, hemos resuelto este ejemplo de manera más general para ilustrar el uso de los componentes de movimiento. La solución directa sería evidente si las ecuaciones se combinaran algebraicamente antes de realizar los cálculos, como sigue:

$$x = v_x t = (v \cos \theta)t$$

y

$$y = v_y t = (v \operatorname{sen} \theta)t$$

de lo que se sigue que

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(v \cos \theta)^2 t^2 + (v \operatorname{sen} \theta)^2 t^2} = \sqrt{v^2 t^2 (\cos^2 \theta + \operatorname{sen}^2 \theta)} = vt$$

Antes de adoptar la primera estrategia de resolución que se le ocurra, piense un momento si habría una forma más fácil o directa de enfrentar el problema.

Ecuaciones de cinemática para componentes de movimiento

El ejemplo 3.1 se refirió a un movimiento bidimensional en un plano. Si la velocidad es constante (componentes constantes v_x y v_y), el movimiento será en línea recta. El movimiento también puede acelerarse. Para un movimiento en un plano con *aceleración constante*, cuyos componentes son a_x y a_y, las componentes de desplazamiento y velocidad están dadas por las ecuaciones de cinemática del capítulo 2 para las direcciones x y y, respectivamente:

$$\left.\begin{aligned} x &= x_o + v_{x_o}t + \tfrac{1}{2}a_xt^2 \\ y &= y_o + v_{y_o}t + \tfrac{1}{2}a_yt^2 \\ v_x &= v_{x_o} + a_xt \\ v_y &= v_{y_o} + a_yt \end{aligned}\right\} \quad \textit{(sólo aceleración constante)} \quad \begin{matrix}(3.3a)\\(3.3b)\\(3.3c)\\(3.3d)\end{matrix}$$

Ecuaciones de cinemática para componentes de desplazamiento y velocidad

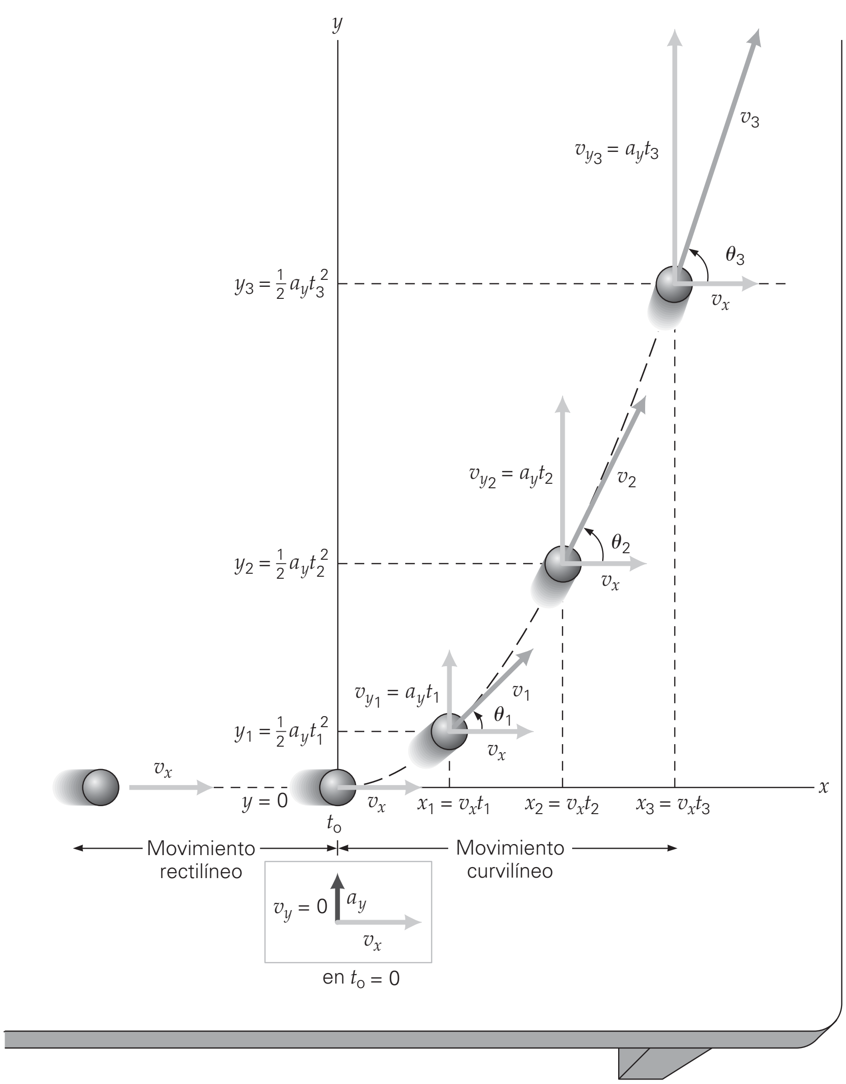
Si un objeto se mueve inicialmente con velocidad constante y de repente experimenta una aceleración en la dirección de la velocidad o en la dirección opuesta, seguirá su camino rectilíneo acelerando o frenando, respectivamente.

No obstante, si la aceleración tiene un ángulo distinto de 0° o 180° respecto al vector de velocidad, el movimiento seguirá una trayectoria curva. Para que el movimiento de un objeto sea *curvilíneo* —es decir, que se desvíe de una trayectoria recta— se necesita una aceleración. En una trayectoria curva, el cociente de los componentes de velocidad varía con el tiempo. Es decir, la dirección del movimiento, $\theta = \tan^{-1}(v_y/v_x)$, varía con el tiempo, ya que uno de los componentes de velocidad, o ambos, lo hacen.

Considere una pelota que inicialmente se mueve sobre el eje x, como se ilustra en la ▼figura 3.2. Suponga que, a partir del tiempo $t_o = 0$, la pelota recibe una aceleración

PHYSLET®

Exploración 3.2 Empleo de Gauntlet para controlar *x*, *v* y *a*



◀ **FIGURA 3.2 Movimiento curvilíneo** Una aceleración no paralela a la velocidad instantánea produce una trayectoria curva. Aquí se aplica una aceleración a_y en $t_o = 0$ a una pelota que inicialmente se movía con velocidad constante v_x. El resultado es una trayectoria curva con los componentes de velocidad que se muestran. Observe cómo v_y aumenta con el tiempo, en tanto que v_x permanece constante.

constante a_y en la dirección y. La magnitud del componente x del desplazamiento de la pelota está dada por $x = v_x t$; donde el término $\frac{1}{2}a_x t^2$ de la ecuación 3.3a se elimina por que no hay aceleración en la dirección x. Antes de t_o, el movimiento es en línea recta sobre el eje x; pero en cualquier momento después de t_o, la coordenada y no es cero y está dada por $y = \frac{1}{2}a_y t^2$ (ecuación 3.3b con $y_o = 0$ y $v_{yo} = 0$). El resultado es una trayectoria curva para la pelota.

Ilustración 3.3 La dirección de vectores de velocidad y aceleración

Observemos que la longitud (magnitud) del componente de velocidad v_y cambia con el tiempo, en tanto que la del componente v_x permanece constante. El vector de velocidad total *en cualquier momento* es tangente a la trayectoria curva de la pelota. Forma un ángulo θ con el eje x positivo, dado por $\theta = \tan^{-1}(v_y/v_x)$, que ahora cambia con el tiempo, como vemos en la figura 3.2 y en el ejemplo 3.2.

Ejemplo 3.2 ■ Una trayectoria curva: componentes vectoriales

Supongamos que la pelota de la figura 3.2 tiene una velocidad inicial de 1.50 m/s sobre el eje x y que, a partir de $t_o = 0$, recibe una aceleración de 2.80 m/s^2 en la dirección y. *a*) ¿Dónde estará la pelota 3.00 s después de t_o? *b*) ¿Qué velocidad tiene la pelota en ese momento?

Razonamiento. Tenga en cuenta que los movimientos en las direcciones x y y se pueden analizar de forma independiente. Para *a*), simplemente calculamos las posiciones x y y en el tiempo dado, tomando en cuenta la aceleración en la dirección y. Para *b*), obtenemos las velocidades componentes y las combinamos vectorialmente para determinar a la velocidad total.

Solución. Remitiéndonos a la figura 3.2, tenemos lo siguiente:

Dado: $v_{x_o} = v_x = 1.50$ m/s
$v_{y_o} = 0$
$a_x = 0$
$a_y = 2.80$ m/s^2
$t = 3.00$ s

Encuentre: *a*) (x, y) (coordenadas de posición)
b) v (velocidad, magnitud y dirección)

***a*)** 3.00 s después de t_o las ecuaciones 3.3a y 3.3b nos dicen que la pelota recorrió las siguientes distancias desde el origen ($x_o = y_o = 0$) en las direcciones x y y, respectivamente:

$$x = v_{x_o}t + \tfrac{1}{2}a_x t^2 = (1.50\text{ m/s})(3.00\text{ s}) + 0 = 4.50\text{ m}$$
$$y = v_{y_o}t + \tfrac{1}{2}a_y t^2 = 0 + \tfrac{1}{2}(2.80\text{ m/s}^2)(3.00\text{ s})^2 = 12.6\text{ m}$$

Así pues, la posición de la pelota es $(x, y) = (4.50\text{ m}, 12.6\text{ m})$. Si hubiéramos calculado la distancia $d = \sqrt{x^2 + y^2}$, ¿qué habríamos obtenido? (Note que esta cantidad no es la distancia real que la pelota recorrió en 3.00 s, sino más bien la magnitud del *desplazamiento*, es decir, la distancia en línea recta, desde el origen hasta $t = 3.00$ s.)

Nota: no confunda la dirección de la velocidad con la dirección del desplazamiento respecto al origen. La dirección de la velocidad siempre es tangente a la trayectoria.

***b*)** El componente x de la velocidad está dado por la ecuación 3.3c:

$$v_x = v_{x_o} + a_x t = 1.50\text{ m/s} + 0 = 1.50\text{ m/s}$$

(Este componente es constante, pues no hay aceleración en la dirección x.) Asimismo, el componente y de la velocidad está dado por la ecuación 3.3d:

$$v_y = v_{y_o} + a_y t = 0 + (2.80\text{ m/s}^2)(3.00\text{ s}) = 8.40\text{ m/s}$$

Por lo tanto, la magnitud de la velocidad es

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(1.50\text{ m/s})^2 + (8.40\text{ m/s})^2} = 8.53\text{ m/s}$$

y su dirección relativa al eje $+x$ es

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{8.40\text{ m/s}}{1.50\text{ m/s}}\right) = 79.9°$$

Ejercicio de refuerzo. Suponga que la pelota de este ejemplo también recibió una aceleración de 1.00 m/s^2 en la dirección $+x$ a partir de t_o. ¿En qué posición estaría la pelota 3.00 s después de t_o en este caso?

Sugerencia para resolver problemas

Al usar las ecuaciones de cinemática, es importante recordar que el movimiento en las direcciones x y y se puede analizar de forma independiente; el factor que las vincula es el tiempo t. Es decir, obtenemos (x, y) y/o (v_x, v_y) en un tiempo t dado. También hay que tener en cuenta que a menudo tomamos $x_o = 0$ y $y_o = 0$, lo que significa que ubicamos al objeto en el origen en $t_o = 0$. Si el objeto en realidad está en otro lugar en $t_o = 0$, será necesario usar los valores de x_o y/o y_o en las ecuaciones adecuadas. (Véase ecuaciones 3.3a y b.)

3.2 Suma y resta de vectores

OBJETIVOS: *a*) Aprender la notación vectorial, *b*) ser capaz de sumar y restar vectores gráfica y analíticamente, y *c*) usar vectores para describir un movimiento en dos dimensiones.

Muchas cantidades físicas, incluidas aquellas que describen el movimiento, están asociadas a una dirección; es decir, son vectoriales. Ya trabajamos con algunas de esas cantidades relacionadas con el movimiento (desplazamiento, velocidad y aceleración), y encontraremos más durante el curso. Una técnica muy importante para analizar muchas situaciones físicas es la suma (y la resta) de vectores. Sumando o combinando tales cantidades (**suma vectorial**) podemos obtener el efecto total o neto: la *resultante*, que es como se llama a la *suma de vectores*.

Ya sumamos algunos vectores. En el capítulo 2 sumamos desplazamientos en una dimensión para obtener el desplazamiento neto. En este capítulo sumaremos componentes de vectores de movimiento, para calcular efectos netos. Recordemos que, en el ejemplo 3.2, combinamos los componentes de velocidad v_x y v_y para obtener la velocidad resultante.

En esta sección, examinaremos la suma y resta de vectores en general, junto con una notación vectorial común. Como veremos, estas operaciones no son iguales a la suma y resta de escalares o numéricas, que ya conocemos. Los vectores tienen *tanto* magnitud *como* dirección, por lo que aplicamos reglas distintas.

En general, hay métodos geométricos (gráficos) y analíticos (computacionales) para sumar vectores. Los métodos geométricos son útiles para visualizar los conceptos de la suma vectorial, sobre todo con un dibujo rápido. Sin embargo, los métodos analíticos se usan con mayor frecuencia porque son más rápidos y más precisos.

En la sección 3.1 nos enfocamos sobre todo en componentes de vectores. La notación para las magnitudes de los componentes era, por ejemplo, v_x y v_y. Para representar vectores se utilizará la notación $\vec{\mathbf{A}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$ (un símbolo en negritas testado con una flecha).

Nota: en notación vectorial, los vectores representan con símbolos en negritas y con flecha arriba, como $\vec{\mathbf{A}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$, y sus magnitudes con símbolos en cursivas, como A y B. En la mayoría de las cifras, los vectores se representan con flechas (para *dirección*), cuya *magnitud* se indica a continuación.

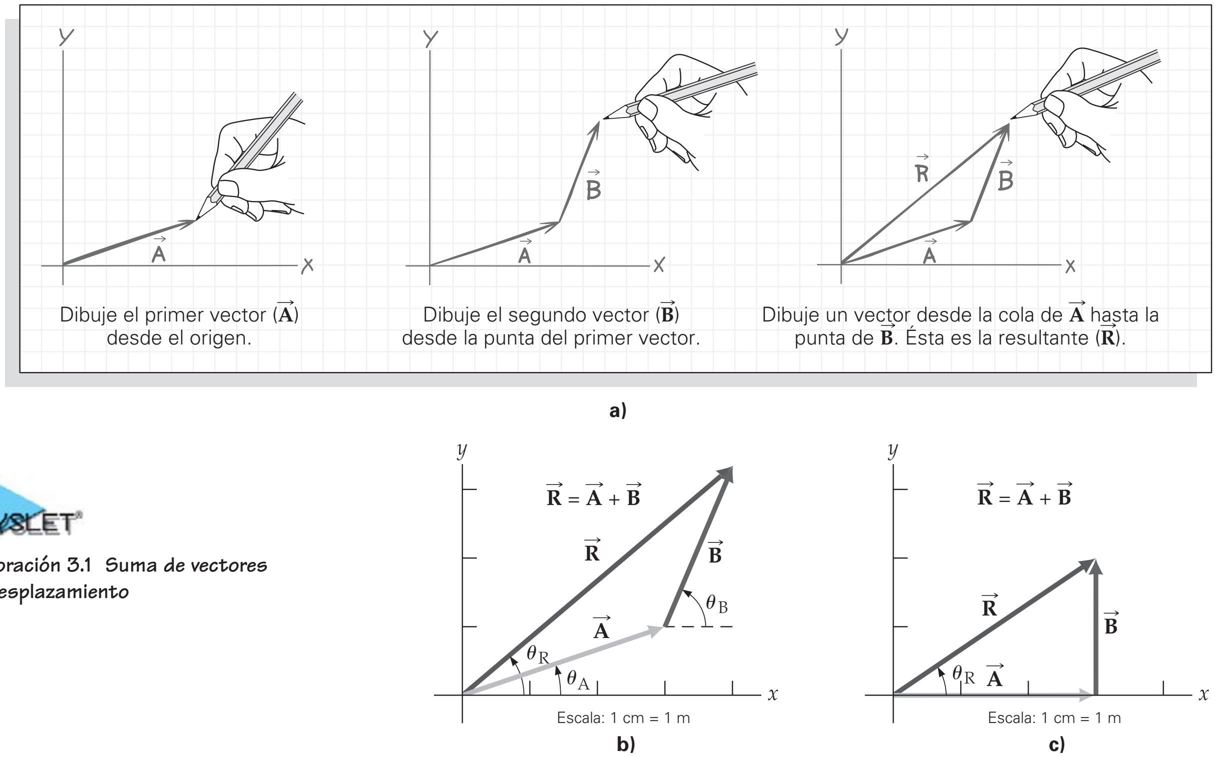
Suma de vectores: métodos geométricos

Método del triángulo Para sumar dos vectores, digamos $\vec{\mathbf{B}}$ y $\vec{\mathbf{A}}$ (es decir, para obtener $\vec{\mathbf{A}} + \vec{\mathbf{B}}$) con el **método del triángulo**, primero dibujamos $\vec{\mathbf{A}}$ en una hoja de papel milimétrico usando cierta escala (▼figura 3.3a). Por ejemplo, si $\vec{\mathbf{A}}$ es un desplazamiento en metros, una escala conveniente sería 1 cm : 1 m, de modo que un vector de 1 cm de longitud en el diagrama corresponda a 1 m de desplazamiento. Como se indica en la figura 3.3b, la dirección del vector $\vec{\mathbf{A}}$ se especifica con un ángulo θ_A relativo a un eje de coordenadas, por lo regular el eje x.

Nota: un vector (flecha) se puede desplazar en los métodos de suma de vectores: siempre y cuando no alteremos su longitud (magnitud) ni su dirección, no modificaremos el vector.

Luego, dibujamos $\vec{\mathbf{B}}$ con su cola en la punta de $\vec{\mathbf{A}}$. (Por esto, el método también se conoce como *método de punta a cola*.) El vector que va desde la cola de $\vec{\mathbf{A}}$ hasta la punta de $\vec{\mathbf{B}}$ será entonces el vector suma $\vec{\mathbf{R}}$, o la resultante de los dos vectores: $\vec{\mathbf{R}} = \vec{\mathbf{A}} + \vec{\mathbf{B}}$.

Si los vectores se dibujaron a escala, se podrá obtener la magnitud de $\vec{\mathbf{R}}$ midiendo su longitud y aplicando la conversión de escala. Con un enfoque gráfico así, la dirección del ángulo θ_R se mide con un transportador. Si conocemos las magnitudes y direcciones (ángulos θ) de $\vec{\mathbf{A}}$ y de $\vec{\mathbf{B}}$, también podremos calcular analíticamente la magnitud y la dirección de $\vec{\mathbf{R}}$ utilizando métodos trigonométricos. En el caso del triángulo no rectángulo de la figura 3.3b, utilizaríamos las leyes de los senos y cosenos. (Véase el apén-



Exploración 3.1 Suma de vectores de desplazamiento

▲ **FIGURA 3.3 Método del triángulo para suma de vectores** ***a)*** Los vectores $\vec{\mathbf{A}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$ se colocan punta a cola. El vector que se extiende desde la cola de $\vec{\mathbf{A}}$ hasta la punta de $\vec{\mathbf{B}}$, formando el tercer lado del triángulo, es la resultante o suma $\vec{\mathbf{R}} = \vec{\mathbf{A}} + \vec{\mathbf{B}}$. ***b)*** Cuando los vectores se dibujan a escala, se puede obtener la magnitud de $\vec{\mathbf{R}}$ midiendo la longitud $\vec{\mathbf{R}}$ y aplicando la conversión de escala, y entonces el ángulo de dirección θ_R se mide con un transportador. También pueden usarse métodos analíticos. En el caso de un triángulo no rectángulo, como en el inciso *b*, se pueden usar las leyes de los senos y los cosenos para determinar la magnitud de $\vec{\mathbf{R}}$ y de θ_R (apéndice I). ***c)*** Si el triángulo vectorial es rectángulo, $\vec{\mathbf{R}}$ es fácil de obtener usando el teorema de Pitágoras, de manera que el ángulo de dirección está dado por una función trigonométrica inversa.

dice I.) El método de punta a cola puede aplicarse a cualquier número de vectores. El vector que forma la cola del primer vector a la punta del segundo es la resultante o suma de vectores. Para más de dos vectores, se denomina método del polígono.

La resultante del triángulo rectángulo de vectores de la figura 3.3c sería mucho más fácil de calcular, utilizando el teorema de Pitágoras para obtener la magnitud, y una función trigonométrica inversa para obtener el ángulo de dirección. Observe que $\vec{\mathbf{R}}$ está constituido por los componentes x y y de $\vec{\mathbf{A}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$. Tales componentes x y y son la base del método analítico de componentes que estudiaremos brevemente.

Resta de vectores La resta de vectores es un caso especial de la suma:

$$\vec{\mathbf{A}} - \vec{\mathbf{B}} = \vec{\mathbf{A}} + (-\vec{\mathbf{B}})$$

Es decir, para restar $\vec{\mathbf{B}}$ de $\vec{\mathbf{A}}$, sumamos un $\vec{\mathbf{B}}$ *negativo* a $\vec{\mathbf{A}}$. En el capítulo 2 vimos que un signo menos simplemente significa que el sentido del vector es opuesto al de aquel que lleva el signo más (por ejemplo, $+x$ y $-x$). Lo mismo es válido para los vectores con notación de negritas. El vector $-\vec{\mathbf{B}}$ tiene la misma magnitud que el vector $\vec{\mathbf{B}}$, pero está en sentido opuesto (▸figura 3.4). El diagrama vectorial de la figura 3.4 muestra una representación gráfica de $\vec{\mathbf{A}} - \vec{\mathbf{B}}$.